

دافيد رويل

المصادفة والشواش

ترجمة

طاهر شاهين

ديمة شاهين





المصادفة والشواش

دافيد رويـل

المصادفة والشـواش

ترجـمة
طاهر شاهين
ديمـة شاهين



منشـورات وزارة الثقـافـة
في الجمهورية العربية السورية
دمشـق ٢٠٠٦

العنوان الأصلي للكتاب :

DAVID RUELLE

HASARD ET CHAOS

المصادفة والشواش = HASARD ET CHAOS / دافيد رويل ؛
ترجمة طاهر شـــاهين ، ديمة شـــاهين .- دمشق : وزارة الثقافة،
٢٠٠٦ .- ٢٧٠ ص ؛ ٢٤ سم .
(قضايا فلسفية ؛ ١) .

١- ٥١٩ ر و ي م ٢- العنوان ٣- رويـــل
٤- شاهين ٥- شاهين ٦- السلسلة
مكتبة الأسد

قضايا فلسفية
«1»

تقديم

Suam habet fortuna rationem

إن للمصادفة أسبابها، هذا ما قاله بترون، ولكن أية أسباب؟ وما هي في الحقيقة المصادفة؟ ومن أين تأتينا؟ ولأي درجة يمكن توقع المستقبل أو عدم توقعه؟ تعطي الفيزياء والرياضيات لكل هذه الأسئلة بعض الأجوبة، أجوبة متواضعة وأحياناً غير مؤكدة، ولكن من الواجب معرفتها، والكتاب الحالي مخصص لها.

إنّ قوانين الفيزياء هي قوانين حتمية، كيف إذن للمصادفة أن تنبثق في وصفنا للطبيعة؟ والتي كما سنرى تقوم بذلك بأشكال شتى، وسنرى أيضاً أن هناك حدوداً دقيقة لإمكانياتنا لاستشراف المستقبل. لذلك سأعرض مشاهد مختلفة للمصادفة ولمسائل التنبؤ متتبعاً الأفكار العلمية القديمة والحديثة المقبولة عموماً أو التي يمكن قبولها، وسأناقش بخاصة مع بعض التفصيل الآراء الحديثة حول الشواش. ليسَ الأسلوبُ المتبعُ في هذا الكتاب أسلوباً تقنياً، ويمكن تخطي المعادلات القليلة التي يمكن أن يصادفها القارئ دون أي تأثير، فكل ما تتطلبُه قراءة الفصول التالية هو مبدئياً الإلمام برياضيات وفيزياء لمستوى الدراسة الثانوية.

بالنسبة للملاحظات في نهاية الكتاب فإن بعضها هي ملاحظات غير معقدة والبعض الآخر أكثر تقنية، وهي موجهة إلى الزملاء العلماء الذين يمكن أن يقرؤوا هذا المؤَلف.

بما أن الكلام يتطرق إلى الزملاء الأعزاء، فإنني أخشى أن يغضب بعضهم للوصف القليل التفخيم الذي وصفت به العلميين وعاَلم البحث عموماً، ولكن ماذا؟ إذا كان العلم هو البحث عن الحقيقة أليس من الواجب أن نقول الحقيقة عن الطريقِة التي يتم فيها تكوين العلم؟

بور- سور- إفيت

Bures - sure - Yvette

خريف 1990

كلمة شكر

لقد استفدت خلال تحضير هذا الكتاب من المناقشات التي تمت مع الكثير من الزملاء والأصدقاء:مارسيل برجير، جان كلود دو شامب، جان بيير اكمان، كريستيان فرونيي، شلدون غولدشتاين، جانين ونيكولاس روبل، وآرثر وايتمان. لقد قرؤوا كل أو بعض هذا المؤلف "**المصادفة والشواش**" ومنحوني نصائحهم (التي لم اتبعها دوماً)، ولقد سمح لي أوسكار لان فورد نسخ رسمه بواسطة الحاسب لجاذب لورنتز، كما قامت مدام هيلغا ديرنوا بطبع هذا الكتاب على الداكتيلو بكرم كبيرٍ منها أولاً بالإنكليزية، ومن ثم بالفرنسية، لهم جميعاً أقدم شكري.

الفصل الأول

المصادفة

ستصبح الحواسيب عما قريب منافسة لعلماء الرياضيات، ويمكن أن تحيلهم إلى عاطلين عن العمل، هذا ما أكدته لزميلي المبجل الرياضي بيير دولييني Pierre Deligne مماحكاً، لقد قلت له أنه أصبح هناك آلات تستطيع أن تلعب الشطرنج جيداً. بالإضافة إلى ذلك لم يكن من المستطاع برهنة ***نظرية الألوان الأربعة***(1) إلا بمساعدة عمليات تحقق تمت بواسطة الحاسوب، ولاشيء يمنع من أن تصبح هذه الآلات أكثر طواعيةً، وأن تقلد العمليات الفكرية التي يقوم بها الإنسان بالسرعة والدقة الفائقتين اللتين تتصف بها. وهكذا يمكن أن نرى خلال الخمسين أو مئة أو ربما المئتي سنة القادمة حواسيبَ ليس فقط يمكنها مساعدة علماء الرياضيات في أعمالهم، ولكن أخذ المبادرة وإيجاد التعاريف الطبيعية والمنتجة في أعمالهم، ومن ثم اقتراح وإثبات نظريات جديدة يمكن أن تكون برهنتها تتجاوز الإمكانيات البشرية، فقد تم تشكيل دماغنا بالانتخاب الطبيعي، ليس بهدف العمل الرياضي ولكن لإعطائنا الأفضلية في الصيد وفي الجني، في الحرب وفي العلاقات الاجتماعية.

بالطبع لم يُظهر بيير دولينيي حماساً كبيراً لهذه الرؤية لمستقبل الرياضيات، وانتهى إلى القول إن ما يشغله شخصياً هو النتائج التي يمكن له أن يفهمها بمفرده بشكل كامل، وهذا يستثني من جهته النتائج التي تكون براهينها بحاجة إلى مساعدة الحاسوب، والنتائج التي تكون براهينها طويلة بحيث تتجاوز إمكانيات التحقق منها إمكانيات عالم رياضيات واحد لذلك تحتاج إلى جهد رياضيين عديدين، ولقد أشار دوليني إلى نظرية شهيرة تتعلق بتصنيف ***الزمر المنتهية البسيطة***[2]، والتي يتكون برهانها من قطع عديدة، ويمتد على أكثر من خمسة آلاف صفحة كمثال على وجهة نظره.

يمكن أن نرسم بدون صعوبة ومن خلال ما ذكرته لوحة بائسة للحالة المعاصرة للعلم ولمستقبله. في الحقيقة فإنه إذا أصبح من الصعب لرياضي أن يسيطر وحيداً على سؤال واحد-البرهنة على نظرية واحدة- فإن هذا صحيح بدرجة أكبر بالنسبة لزملائه من ذوي الاختصاصات العلمية الأخرى. يستعمل الباحث سواء كانَ فيزيائياً أو طبيباً أدواتٍ لايعلم كيفية عملها وذلك بسبب ضغط مقتضيات الكفاءة، فبالرغم من أنّ العلم شامل، ولكن خدامه هم ذوو اختصاصات ضيقة ويمكن أن تكون اهتماماتهم محدودة على الأغلب. لقد تغير الإطار الثقافي والاجتماعي للبحث العلمي كثيراً منذ نشوئه دون شك، فقد كان من يقومون بالعلم حينذاك يُدعون بالفلاسفة بدلاً من باحثين، وكانوا يحاولون امتلاك فهم إجمالي للعالم الذي نوجد فيه، أي نظرة مركبة لطبيعة الأشياء، فمن المميز أن نيوتن العظيم وزع جهوده ما بين الرياضيات والفيزياء والسيمياء واللاهوت ودراسة التاريخ المتعلق

بالنبوءات[3]، هل تخلينا إذن عن البحث الفلسفي الذي أنتج العلم؟ إطلاقاً، إن البحث الفلسفي يستخدم وسائل جديدة ولكنه يبقى في المركز، وهذا ما سأبيِّنه في هذا الكتاب، لذا فلن يكون هناك ذكر فيما يلي للانتصارات التقنية للعلم، لا شيء عن الصواريخ ولا عن مسرِّعات الجسيمات، لاشيء عن أفضال الطب أو عن الخطر النووي، كما لا ذكر أيضاً لماورائيات الطبيعة. أريد فقط أن أضع النظارات الفلسفية لرجل شريف من القرن السابع عشر أو الثامن عشر، وأن أقوم بنزهة بين النتائج، نزهة توجهها *المصادفة*، وهذا ما أعنيه حرفياً، حيث أن المصادفة تشكل بالنسبة لي خيط آريان* العلمي للقرن العشرين.

المصادفة، الارتياب، الحظ الأعمى، جميعها تصورات سلبية تماماً، أليست تقع في مجال قراءة البخت أكثر منها في مجال العلم؟ لقد بدأ الاستعمال العلمي للمصادفة مع بليز باسكال Blaise Pascal، وبيير فيرما Pierre Fermat، وكريستيان هايجنز Christian Huygens، وجاك برنوييي Jacques Bernoulli، وذلك من خلال تحليل الألعاب التي دعيت بألعاب الحظ أو المصادفة، وأنتج هذا التحليل علماً دُعِيَ ***حساب الاحتمالات*** أُعتبر لوقتٍ طويل فرعاً ثانوياً من فروع الرياضيات. تتلخص إحدى الحقائق الأساسية في حساب الاحتمالات في أنه إذا لعبت

---

* يط آر يانن le fil d'Ariane: بحسب الأسطورة الإغريقية، أعطى آريان خيطاً للبطل الأغريقي تسيوس Thésée للنجاة من المتاهة التي دخلها ليقتل الميناتور Minotaure (وحش إغريقي له رأس ثور وجسم إنسان)، وأصبح هذا الخيط كناية عن الدليل للخروج من المآزق والإشكالات- المترجم.

بالطرّة أو النقش عدداً كبيراً من المرات فإن نسبة الطرة أو النقش تصبح قريبةً جداً من خمسين في المئة حينذاك، وهكذا يمكن الوصول من ارتيابٍ تام في نتيجة محاولةٍ وحيدة إلى تأكيدٍ شبه تام لنتيجة سلسلةٍ طويلة من المحاولات، هذا الانتقال من الارتياب إلى ما يشبه التأكيد الذي ينتج عن ملاحظتنا ***لمتواليات طويلة*** من الأحداث أو من ***المنظومات الكبرى*** هو موضوع أساسي في دراسة المصادفة. كان كثيرٌ من الفيزيائيين والكيميائيين، حتى حوالي سنة 1900، مازالوا يرفضون فكرة أن المادة مكونة من ذرات وجزيئات، في حين قبل الكثيرون منذ زمن بعيد حقيقة أنه يوجد في لتر من الهواء عددٌ لا يمكن تصوره من الجزيئات التي تنطلق في كل اتجاه وبسرعاتٍ كبيرة وتتصادم في حالة فوضى مخيفة، هذه الفوضى التي دعيت ***الشواش الجزيئي*** هي باختصار: الكثير من المصادفة في حجم صغير، لكن كم من المصادفة؟ إن لهذا السؤال معنى، ويمكن الإجابة عليه بفضل ***الميكانيك الإحصائي*** الذي وُضعت أسسه حوالي سنة 1900 بفضل أبحاث النمساوي لودفيك بولتزمان والأمريكي ويليم جيبز، فكمية المصادفة الموجودة في لتر من الهواء أو في كيلو من الرصاص في درجة حرارة معينة تُقاس ***بأنطروبية*** هذا اللتر من الهواء أو الكيلو من الرصاص، ولدينا الآن الوسائل لتعيين هذه الأنطروبية بدقة وهكذا نلاحظ أن المصادفة "دجِّنت"، وأصبحت لا غنىً عنها لفهم المادة.

يمكن أن تظن أن ما هو حادثٌ "بالمصادفة" لا معنى له، ولكن قليلاً من التأمل يُظهر أنه ليس كذلك: إن الزمر الدموية موزعة

عشوائياً بين السكان الفرنسيين، ولكن ذلك لا يعني كون الزمرة A^+ أو O^- في حالة نقل الدم لمريض هو أمرٌ متكافئ. إن ***نظرية المعلومات*** التي أسسها الرياضي الأمريكي كلوْد شانون في نهاية الأربعينيات تمكّن من قياس كمية المعلومات المحتواة في رسائل لها أساساً معنىً ما، وسنرى أن كمية المعلومات الوسطية لرسالة ما تُعَّرف بكمية المصادفة المحتواة في مختلف الرسائل الممكنة. وهكذا فإن نظرية المعلومات والميكانيك الإحصائي يهتمان بقياس كمية المصادفة، وهاتان النظريتان شديدتا الارتباط.

وبما أننا نتكلم عن الرسائل ذات المعنى فإنني أريد أن أورد هنا رسائل حاملة لمعلومات هامة جداً: إنها الرسائل الجينية، فقد تمت البرهنة حالياً على أن الصفات الوراثية للحيوانات والنباتات تنتقل بواسطة ***حمض الـAND*** ◆ ***(حمض ديوكسي ريبو نيكلويك)*** الذي يوجد أيضاً إضافةً إلى الحيوانات والنباتات-في البكتيريا وفي بعض الفيروسات (في بعض الفيروسات الأخرى يستعاض عنه بحمض ريبونيوكليك)، وعلى أن ***AND*** مكون من سلسلة طويلة لعناصر تنتمي لأربع أنواع يمكن أن نرمز لها بالأحرف A,T,G,C. إن المعلومات الوراثية موجودةٌ إذن في رسائل طويلة مكتوبة بأبجدية مكونة من أربعة أحرف؛ عند الانقسام الخلوي يعد نسخ هذه الرسائل مع بعض الأخطاء العشوائية التي تدعى ***الطفرات،*** وبالتالي فإن الخلايا الجديدة أو الأفراد الجدد مختلفون قليلاً عن أسلافهم وقابلون للبقاء وللتناسل

◆ AND: اختصار فرنسي يكافئ DNA في اللغة الإنكليزية- المترجم.

بدورهم بدرجةٍ أقل أو أكثر. إن ***الانتخاب الطبيعي*** يصطفي الأفراد الأكثر استعداداً أو الأوفر حظاً، وهكذا فإن المسائل الأساسية للحياة يمكن أن توصّف بحدود خلق ونقل الرسائل الجنية بوجود المصادفة[4]. إن هذا لا يحل المشاكل الكبرى لأصل الحياة ولتطور الأنواع، ولكن بتوصيف هذه المسائل من زاوية خلق ونقل المعلومات يمكن أن نصل إلى وجهات نظر موحية، وحتى إلى بعض النتائج الأكيدة، ولنا عودة إلى هذا.

ولكن قبل أن نبحث في الوظيفة الخلّاقة للمصادفة في السيرورات الحياتية، فإنني أحب أن أقودك أنت أيها القارئ في نزهةٍ طويلة عبر مسائل أخرى سنتكلم عن الميكانيك الإحصائي وعن نظرية المعلومات، سنناقش الاضطراب والمصادفة ووظيفة المصادفة في الميكانيك الكمي وفي نظرية الألعاب، وسنعود لدرس الحتمية التاريخية والثقوب السوداء والتعقيد الخوارزمي وأشياء أخرى أيضاً.

وسنقوم بجولتنا الطويلة ضمن تقاطع مساحتين فكريتين كبيرتين: من جهة الرياضيات الصارمة، ومن الجهة الأخرى الفيزياء بالمعنى الأعم شاملةً في الحقيقة جميع العلوم الطبيعية، محتفظين أيضاً بعين مفتوحة على عمل الروح البشرية في محاولاتها المدهشة على الأغلب والمثيرة للأسى أحياناً لفهم طبيعة الأشياء. وهكذا فإننا نحاول، في ما وراء البحث في مشكلة المصادفة، فهم العلاقة الثلاثية المدهشة بين غرائبية الرياضيات وغرائبية العالم المادي وغرائبية روحنا الإنسانية الخاصة. أرغب بدايةً مناقشة بعض قواعد لعب الرياضيات والفيزياء.

الفصل الثاني

رياضيات وفيزياء

تظهر الموهبة الرياضية عادةً في سنٍ مبكرة، هذه ملاحظة شائعة، وقد أضاف عليها الرياضي الروسي أندريه كولموغوروف Andrei N. Klomogorov اقتراحه العجيب القائل بأن التطور النفسي الطبيعي لأي شخص يتوقف في اللحظة التي تتفتح فيها موهبته الرياضية. وهكذا فإن كولموغوروف يعطي نفسه العمر العقلي اثني عشر عاماً، في حين لم يعط مواطنه إيفان فينوغرادوف، الذي كان ولفترة طويلة عضواً مهماً ومخيفاً في الأكاديمية العلمية الروسية، من العمر سوى ثماني سنوات فقط. إن عمر الثماني سنوات الذي أعطاه كولموغوروف للأكاديمي فينوغرادوف Vinogradov هو العمر الذي بحسب رأيه يقوم الصبيان فيه بنتف أجنحة الفراشات وربط الأوعية القديمة بأذناب القطط.

بدون شك ليس من الصعب إيجاد أمثلة مناقضة لنظرية كولموغوروف[1]، ولكن من المدهش أنها غالباً ما تكون صحيحة، وتخطر لي الحالة المتطرفة لزميل: يقدّر عمره العقلي بحوالي ست

سنوات، مما يفرض مشاكل عملية خاصةً فيما إذا ما كان عليه السفر وحيداً، فهو يتصرف بشكل جيد كرياضي، ولكن لا أعتقد أنه قادر على أن يتعايش مع محيط الفيزيائيين الذي هو أكثر عدائية.

ما الذي يجعل من الرياضيات مجالاً بهذه الخصوصية وهذا الاختلاف عن باقي العلوم الأخرى؟ تتكون نقطة الانطلاق لأية نظرية رياضية أولاً من بعض ***القضايا الأساسية*** ***assertion de base*** التي تتناول عدداً من ***الموضوعات الرياضية*** ***objets mathématiques*** (التي هي في الحقيقة كلمات أو تعابير رمزية أخرى)، وانطلاقاً من هذه القضايا الأساسية وباستخدام المنطق البحت نحاول استنتاج قضايا جديدة تدعى نظريات. إن الكلمات المستعملة في الرياضيات يمكن أن تكون كلمات معتادة من مثل ***نقطة وفراغ***، ولكن من الضروري أن لا نثق كثيراً بالحدس العادي الذي لدينا عن هذه الأشياء، وأن نستعمل فقط القضايا الأساسية المعطاة في البداية. إن من المقبول أيضاً الاستعاضة عن استخدام "نقطة" و"فراغ" بـ "كرسي" و"طاولة"، ويمكن أن يكون هذا أكثر ملاءمة، لذلك لا يتورع الرياضيون عن استعمال هكذا استعاضات. ومن هذا المنظور فإن العمل الرياضي يشبه تمريناً في النحو ذا قواعد صارمة جداً: يُشكل الرياضي انطلاقاً من قضايا أساسية اختارها سلسلةً جديدة من القضايا حتى يصل منها إلى قضية جميلة، والزملاء المدعوون لملاحظة القضية الناتجة مؤخراً يقولون "يا للنظرية الجميلة". تُكوّن سلسلة القضايا الوسيطية برهانَ النظرية، وهذا البرهان غالباً ما يكونُ طويلاً بشكل مدهش في حالة نظرية

ذات تعبير سهل ومختصر. إن *طول البرهان* هو ما يجعل الرياضيات مثيرة، وهو ما يجعل من هذا عملاً ذا أهمية فلسفية أساسية، وتتصل كلٍ من مسألة التعقيد الخوارزمي ونظرية غودل بمسألة طول البرهان، ولنا عودة لهذا في فصول تالية[2].

بسبب طول البراهين الرياضية فإن من الصعب اكتشافها، إذ من الواجب تكوين، وبدون خطأ، سلسلة طويلة من القضايا وتصوُّرها بشكل واضح، وهذا يعني تمييز ما هو صحيح عن ما هو خاطئ، ما هو مفيد وما هو غير مفيد، وحدس أيّ التعريفات ملائمة وإيجاد "القضايا المفتاحيّة" التي تسمح بتطوير نظرية ما بطريقة طبيعية.

لا ينبغي الاعتقاد أن اللعِب الرياضي هو تعسفي واعتباطي، إن النظريات الرياضية المختلفة لها علاقات بينية عديدة: مواضيع نظرية ما يمكن أن يكون لها تفسيرات أخرى في نظرية أخرى وهذا ما يؤدي إلى وجهات نظر جديدة بناءة. وبدلاً من مجموعات من النظريات المتفرقة من مثل نظرية المجموعات والطوبولوجيا والجبر والتي لكل منها قضاياها الأساسية الخاصة، فإن الرياضيات تشكل كلاً متكاملاً، وللتعبير عن وحدة النظريات هذه فإن الكثير من علماء الرياضيات يفضلون استعمال كلمة رياضة (بصيغة المفرد) بدلاً من الرياضيات (بصيغة الجمع). وهكذا فإن علم الرياضيات (الرياضة) هو مملكة واسعة، وهذه المملكة هي ملكٌ للذين يرون فيها بوضوح: *ذوي الكشف،* أولئك الذين يملكون *الحدس* والقوة الرياضية يشعرون بإحساس كبير بالتفوق بالمقارنة مع معاصريهم العميان، ذاتُ الشعور

بالتفوق الذي يحس به الطيار نحو المشاة أو الشعور الذي تحس به نجمة الرقص الأولى نحو البرجوازيات الصغيرات الممتلئات بالشحم.

يوظّف الرياضي - الحقيقي- الكثير في فنه، إنه نوع من اليوغا المتطلّبة وحتى النسكية المتقشفة. تشغل التصورات والعلاقات الغريبة التفكير الفعلي أو اللافعلي، الواعي أو اللاواعي، (لقد أكد بوانكاريه على الوظيفة اللاواعية للاكتشاف الرياضي[3]، وملاحظة هذه الوظيفة شائعة تماماً)، وهكذا فإن السيطرة على العقل التي يقوم بها تفتح التفكير الرياضي، وغرابة هذا التفكير تجعل من الرياضي كائناً مختلفاً نوعاً ما، وهكذا يمكن تصوّر ما يؤكده كولموغوروف من أن تطوره النفسي قد توقف.

لكن ما هي حالة الفيزيائيين؟ يتصرف الرياضيون والفيزيائيون كإخوان - أعداء ويحبون المبالغة في اختلافاتهم، إلا أن الفيزياء تعبّر عن نفسها بلغة الرياضيات كما ذكر غاليليه[4]، كما أن الفيزيائي هو رياضي من وجهة نظر معينة. لقد لمع أرخميدس ونيوتن، وغيرهما في الفيزياء كما في الرياضيات، إلا أن الفيزياء المرتبطة ارتباطاً وثيقاً بالرياضيات هي في الوقت نفسه مختلفةٌ عنها اختلافاً عميقاً، وهذا ما سأبينه الآن فيما يلي.

إن هدف الفيزياء هو تفسير العالم الذي يحيط بنا، وبشكل نمطي لا يحاول الفيزيائي فهم كل شيء دفعة واحدة، ولكنه يركز على ***قطعة من الواقع***، وهو يقوم بوضع ***تمثيل*** لهذه القطعة من الواقع، في محاولة لتوصيفها بواسطة نظرية رياضية، وهكذا فهو يبدأ بعزل

مجموعة من الظواهر، ويعِّرف ***عملياتياً*** مجموعة من التصورات الفيزيائية. أما بعد أن تم تحديد الإطار الفيزيائي فإن من الواجب اختيار النظرية الرياضية وإقامة توافق بين عناصر هذه النظرية والتصورات الفيزيائية[5]، إن هذا التوافق هو ما يشكل ***النظرية الفيزيائية***. بالطبع تكون النظرية الفيزيائية أفضل كلما كان التوافق ما بين المقادير الفيزيائية والمقادير الرياضية أكثر دقة، وكلما كانت مجموعة الظواهر الموصَّفة أكثر شمولاً. مع ذلك تلعب صعوبة حل المسائل الرياضية دوراً هاماً، ويَقنعُ الفيزيائيون عموماً بنظرية مبسطة إذا كانت دقتها كافية لتطبيق معين.

من الواجب التحقق من أن التعريف العملياتي لتصور فيزيائي ما ليس تعريفاً صورياً. إن التقدم في فهمنا للظواهر يسمح لنا بتحليلٍ أفضل للتعاريف العملياتية، إلا أن هذه التعاريف تبقى أقل دقةً من النظرية الرياضية التي تتعلق بها، فمثلاً إذا كنت توصِّف تجارب كيميائية يمكنك اشتراط أن تكون النواتج صافية بدرجةٍ معقولة، وفي بعض الحالات فإنك تضع حدوداً دقيقة لوجود شوائب معينة، ولكنك إذا صممت على المعرفة المسبقة لكل كميات الشوائب الممكنة فإنك لن تستطيع إجراء أية تجربة. إن دراسة الفيزياء تجعلنا في مواجهة هذه الحقيقة المفارقة: إن تحكمنا بموضوع فيزيائي تحت الدراسة أضعفُ من تحكمنا بدراسة موضوعٍ رياضي ليس له وجود مادي، مما يزعج كثيراً بعض الأشخاص الذين يركزون على دراسة الرياضيات بدلاً من الفيزياء لهذا السبب.

هناك مثالٌ متواضعٌ لنظرية فيزيائية هو ما أدعوه ***نظرية اللعب بالنرد***، وإن قطعة الواقع التي نرغب في فهمها تتمثل في ما نلاحظه عندما نلعب بالنرد. هنالك فكرة عملياتية معرَّفة في نظرية النرد هي فكرة ***الاستقلالية***: إذا هززنا مكعب النرد بشكل جيد بين رميتين متتاليتين نقول إنها رميات مستقلة، وهذا مثال للتوقع الذي تعطيه النظرية: بعد عدد كبير من الرميات المستقلة لمكعبي نرد فإن المجموع سيكون 3 (1 على أحدهما، و 2 على الآخر) في حالة واحدة من أصل 18 حالة تقريباً.

لنلخص ما سبق: نحصل على نظرية فيزيائية بلصق نظرية رياضية إلى قطعةٍ من الواقع، ويوجد الكثير من هذه النظريات التي تغطي مختلف أنواع الظواهر، وحتى لتفسير ظاهرة معينة فإننا نجد تحت تصرفنا عدة نظريات مختلفة، ويعطي الانتقال من إحداها إلى الأخرى بأحسن الأحوال ***تقريباتٍ*** (غير متحكم بها على الأغلب)، أو بأسوء الأحوال مسائلَ منطقية تَكسِر الرؤوس عندما لا تتطابق التصورات الفيزيائية لنظرية ما مع تلك التي لنظرية أخرى، والحقيقةُ أن القفز من نظرية إلى أخرى هو جزءٌ مهم من فن الفيزيائي. يعلن المختصون أنهم يهتمون بـ"تصحيحات كمومية" أو "نهاية غير نسبية" أو لا يقولون شيئاً لأن "السياق" يشير إلى جهة النظر المعتبرة، وفي هذه الشروط يظهر الخطاب الفيزيائي أحياناً وكأنه ملتبسٌ أو مفكك، فكيف يجد الفيزيائيون أنفسهم في هذا الخطاب؟

قبل الرد على هذا السؤال أحب أن أقدم هذه الملاحظة: يقال "الفيزياء" مفردةً وليس "الفيزيائيات" جمعاً، بينما ليس من المؤكد ضرورة القول "الرياضة" مفردةً وليس "الرياضيات" جمعاً. تنتج وحدةُ الفيزياء الأساسية من كونها تصف العالم الفيزيائي الوحيد الذي نعيش فيه، بينما تنتج وحدة الرياضيات من العلاقات المنطقية القائمة بين النظريات الرياضية المختلفة، وبالعكس فإن النظريات الفيزيائية ليست بحاجة لأن تكون متسقة منطقياً، إنها تدين بوحدتها إلى كونها تصف حقيقة فيزيائية وحيدة. ليس لدى الفيزيائي شكوك وجودية تتعلق بالواقع الذي يحاول توصيفه، وكثيراً ما يكون بحاجة إلى عدة نظريات غير متوافقة منطقياً لتمثيل مجموعة من الظواهر. إن عدم الاتساق هذا يمكن أن يحزن الفيزيائي دون شك ولكن ليس إلى درجة تجعله يرفض فيها هذه النظرية أو تلك من النظريات غير المتوافقة، إنه يحتفظ بها جميعاً إلى الوقت الذي يجد فيه نظرية أفضل يمكن أن تأخذ بالحسبان، وبطريقة موحدة، كل الظواهر المدروسة.

كلمة أخيرة للتحذير من الدخول في مناقشاتٍ عامة ومجردة تتعلق بالخاصية "الحتمية" أو "الاحتمالية" للفيزياء وبالخاصية " المحلية" أو "اللامحلية" وغيرها، من الواجب تحديد النظرية الفيزيائية التي هي موضوع البحث وبأي شكل تدخل فيها الحتمية، والمصادفة، والمحليّة. يتطلب كل نقاش فيزيائي ذي معنىً إطاراً عملياتياً، وهذا ما يمكن أن تقدمه نظرية موجودة، وإلا فإن من الواجب تقديمه بالتوصيف الواضح للتجارب التي يمكن بأقل تقدير إجراؤها.

الفصل الثالث

الاحتمالات

يبدأ التأويل العلمي للمصادفة بإدخال مفهوم ***الاحتمالات***. عندما نريد أن نصوغ فكرةً "واضحة حدسياً". يجب علينا دائماً التصرف بالكثير من الحذر، ولنرَ بماذا يتعلق الأمر؟

"إن احتمال أن تمطر بعد ظهر اليوم هو تسعة من عشرة، لذا فإنني سآخذ مظلتي"، نستخدم هذا النوع من التحليل السببي الذي يتضمن فكرة الاحتمال بشكل دائم كلما أردنا أخذ قرارٍ ما. يُقدَّر احتمال سقوط المطر بـ 9/10، أو بتسعين في المئة، أوبـ 0.9، وبصورة عامة تُقدّر الاحتمالات بقيم محدودة بين "الصفر في المئة" و"المئة في المئة"، أو بعبارة أكثر رياضية بين الصفر والواحد. يناظر الاحتمال 0 (صفر) حدثاً مستحيلاً، ويناظر الاحتمال 1 (واحد) حدثاً أكيداً، أما الاحتمال الذي ليس صفراً ولا واحداً فإنه يناظر حدثاً غير أكيد ولكن جهلنا به ليس تاماً، وهكذا فإن حدثاً احتماله 0.000001 (احتمال واحد من مليون) هو حدثٌ احتمال وقوعه قليلٌ جداً.

يعتمد أي نجاحٍ نحققه على الظروف التي يكون بعضها أكيداً والبعض الآخر متقلب، ومن الضروري تقدير احتمالات هذه الأخيرة

بدقة وبالتالي بناء ***نظرية فيزيائية للاحتمالات***. إنني أُصرّ على النعت ***الفيزيائي*** لأنه ليس من الواجب إمكانية حساب الاحتمالات فقط ولكن إمكانية مقارنتها عملياتياً مع الواقع، وإذا ما أُهملت هذه العلاقة مع الواقع فإننا يمكن أن نغرق في مفارقات لا يمكن الخروج منها، ولذا من الواجب أن نكون حذرين عندما نؤكد مثلاً أن "احتمال أن تمطر اليوم بعد الظهر هو 0.9". إن المغزى العملياتي لهذه التأكيد affirmation ليس واضحاً، وهذا أقل ما يمكن أن يقال، ولذا يبقى وضع هذا النوع من التعبيرات حتى اللحظة مبهماً قليلاً.

لنأخذ التأكيد: "عندما أرمي قطعة نقود في الهواء يكون احتمال وقوعها على نقش هو 0.5" هذا ما يبدو منطقياً على الأقل قبل رمي القطعة، ولكنه بالتأكيد خاطئٌ بعد رميها، حيث أن كل عدم تيقن يكون قد زال حينذاك. لكن في أية لحظة تقرر قطعة النقود أن تسقط على الوجه النقش وليس على الوجه الطرّة؟ إذا وضعنا أنفسنا في إطار الحتمية الكلاسيكية فإن حالة الكون في لحظة معينة تقرر حالته في أية لحظة أُخرى، وهكذا فإن الوجه الذي تسقط عليه قطعة النقود مقررٌ عند لحظة خلق الكون! هل يجب التخلي بالتالي عن الاحتمالات؟ أم هل يجب استدعاء الميكانيك الكمومي لكي نستطيع التحدث عن هذا؟ برأيي فإن هذا كوضع المحراث أمام الثيران، ولا يتم العمل في حقل الفيزياء بهذه الطريقة. لنقدم الاحتمالات في إطار أقل ما يكون تحديداً، ودون الكلام عن الميكانيك الكلاسيكي

أو الكمومي، ولنعرِّف التصورات الرياضية والإطار العملياتي للاحتمالات، وبعد ذلك يمكننا مناقشة علاقتها بالحتمية أو الميكانيك الكمومي إلخ.

إن الموقف الفلسفي في تقديم الاحتمالات الذي أريد الدفاع عنه هو التالي: يوجد لكل صنف من الظواهر (وهو ما دعوته ***قطع من الواقع***) تمثيلات تستدعي الاحتمالات، ونحن نهتم بهذه التمثيلات لأنها ***مفيدة***، فمن المفيد أن نعلم أن قطعة النقود إذا رميت في الهواء ستقع على الوجه الطرة أو النقش باحتمالات متعادلة، كما قد يكون من المفيد أن تعلم أنك إذا رميت قطعة نقود عشرين مرة فإن هناك فرصة من بين مليون في أن يظهر في كل مرة الوجه نقش. وهكذا نرى أن الاحتمالات تستبدل عدم اليقين الكامل بشكل آخر ملموس أكثر، ويجب الآن أن نعطي ***لهذا الشيء*** بنية منطقية وعملياتية متوافقة.

إذا لم تكن على دراية بنظرية الاحتمالات (أو بالعلم "الجدّي" بشكل عــام) فإنك ستجـد تتمة هــذا الفصل معقــدة قليلاً، ولكن لا تيأس مع ذلك! لأن ما سأفعله هو إعطاء مثال هو عبارة عن مخطط أولي لنظرية فيزيائية: تصورات فيزيائية معرَّفة عملياتياً، ونظرية رياضية، وعلاقة تربط بين التصورات الفيزيائية والرياضية. والمثال الذي أريد وصفه هو ***النظرية الفيزيائية للاحتمالات***، وهذا المثال من كل النواحي هو مثال بسيط لنظرية فيزيائية.

تتلاعب نظرية الاحتمالات بمقولات من مثل:

احتمال (A) = 0.9

و هذا يعني أن احتمال الحادث (A) هو تسعون في المئة. من وجهة رياضية فإن الحدث (A) هو ببساطة رمزٌ يُعامل حسب قواعد معينة، أما في إطار تمثيل فيزيائي فإن الحدث (A) هو في الواقع حدثٌ من مثل "ستمطر بعد الظهر"، ومن المطلوب تعريفه عملياتياً (مثلاً: قررت أن أتنزه بعد الظهر، إن أمطرت فإنني سأنتبه إلى ذلك. وكالعادة، هذا التعريف غير دقيق في مجال الفيزياء، إذ قد أتعرض للدهس بسيارة قبل نهاية الظهيرة، مما سيضع نهايةً لاهتماماتي بالتنبؤ الجوي).

الحدث (نفي A) من وجهة نظر رياضية هو ببساطة ترتيبٌ جديد للرموز. في كل تمثيل فيزيائي نبحثه فإن الحدث (نفي A) يقابل كون الحدث (A) لن يقع، ويعني هذا في المثال السابق أنها "لن تمطر بعد الظهر".

لندخل الآن إضافةً إلى الحدث (A) حدثاً جديداً، وليكن الحدث (B). من وجهة النظر الرياضية سيسمح هذا لنا بتجميعٍ آخرَ للرموز (A أو B)، (A وB) والتي ترمز هي بدورها أيضاً لأحداث جديدة. في تمثيلٍ فيزيائي يعبر الحدث (B) مثلاً أن "الثلج سيتساقط، ولن تسقط أمطار اليوم بعد الظهر" أو "أن الفطيرة التي سأدعها تسقط، ستسقط على الوجه المدهون بالمربى". يقابل الحدث (A أو B) أنه إما الحدث (A) سيقع، أو أن الحدث (B) سيقع، أو أن كلا الحدثين سيقعان، بينما يقابل الحدث (A وB) أن كلا الحدثين (A) و(B) سيقعان سويةً.

نستطيع الآن إتمام عرضنا للاحتمالات الرياضية بسرد القواعد الأساسية الثلاث التالية:

1- احتمال (نفي A) = 1- احتمال (A)

2- إذا كان (A) و(B) ***غير متوافقين (incompatibles)*** يكون:

احتمال (A أو B) = احتمال (A) + احتمال (B)

3- إذا كان (A) و(B) ***مستقلين (independants)*** يكون:

احتمال (A وB) = احتمال (A) × احتمال (B)

سنناقش هذه القواعد الثلاث بتفصيل أكثر لاحقاً، ولكن لنلاحظ أنها تحوي حدوداً جديدة وغير معرّفة لحوادث ***غير متوافقة*** ولحوادث ***مستقلة***. يقدم أي كتاب عن حساب الاحتمالات بعض القواعد التي تتعلق باستعمال "***لا***" و"***و***" و"***أو***" وتصورات رياضية عن حوادث غير متوافقة ومستقلة. ويضاف أيضاً قضية أو اثنتان أساسيتان تتعلق بالمجموعات اللانهائية للأحداث.سنهمل هذه التفاصيل المهمة بالتأكيد إلا أنها غير ضرورية لما نريد فعله.

لقد قمنا بشرح- بطريقة مختصرة ولكن ليست خاطئة - الأسس الرياضية لحساب الاحتمالات[1]. بقي علينا الآن الواجب المهم أيضاً هو تحديد الإطار ***الفيزيائي*** للاحتمالات، أو بالأحرى الأطر الفيزيائية، وذلك لأن الاحتمالات تدخل في مواقف مختلفة، بحيث أن تعريف خاصة العملياتي للتصورات يجب أن يبحث في كل حالة على حدة، وسنقتصر هنا على إشارات عامة على أن نعود لاحقاً إلى مسائل خاصة.

في التمثيلات الفيزيائية، نقول إن حدثين هما *غير متوافقين* إذا لم يكن من الممكن حدوثهما معاً. لنفرض أن الحدثين (A) و(B) هما بالترتيب "ستمطر بعد الظهر" و"ستثلج بعد الظهر وليس هناك من مطر"، الحدثان (A) و(B) غير متوافقين، وتقول القاعدة رقم 2 بجمع احتماليهما: تسعون بالمئة احتمال سقوط المطر زائد خمسة بالمئة احتمال سقوط الثلج بدون مطر تعطي خمسة وتسعون بالمئة احتمال سقوط مطر أو ثلج وهذا مقنع بديهياً.

يقال عن حدثين أنهما *مستقلان* إذا لم يكن لأحدهما علاقة بالآخر؛ أي أن حدوث أحدهما أو عدم حدوثه ليس له أي تأثير على حدوث الآخر. لنفترض أن (A) و(B) هما بالترتيب "ستمطر بعد الظهر" و"الشطيرة التي سأدعها تسقط، ستسقط على الوجه المدهون بالمربى"، أقدر أن هذين الحدثين ليس بينهما أية علاقة، وأنهما مستقلان تماماً. بتطبيق القاعدة رقم 3 فإنه من الواجب ضرب احتماليهما: الاحتمال 9 0 "أنها ستمطر" في الاحتمال 5 0 "أن الشطيرة ستقع والمربى إلى الأسفل" يعطي 45 0: احتمال الحدثين معاً. وهذا مقنع بديهياً: هناك تسعون بالمئة احتمال.أن تمطر وفي نصف الحالات هناك احتمال أن تقع الشطيرة على الوجه المدهون بالمربى، إذن هناك احتمال خمسة وأربعون بالمئة سقوط المطر في الخارج ودهن أرضية الغرفة بالمربى[2].

وهكذا نكون قد تحققنا من أن القاعدتين 2 و 3 مقبولتان بديهياً. أما بالنسبة للقاعدة رقم 1 فإنها تقول ببساطة أنه إذا كان

احتمال أن تمطر هو تسعون بالمئة فإن احتمال أن لا تمطر هو عشرة بالمئة، وهذا يبدو مما لا يمكن دحضه.

يبدو بوضوح أن الفكرة الأكثر دقة بين الأفكار التي عرضناها هي فكرة الاستقلالية. توحي التجربة والحس العفوي أن بعض الأحداث هي أحداثٌ مستقلة، ولكن يمكن أن نقع على مفاجآت، لذلك يجب التأكد أن احتمالات الحوادث المفترض أنها مستقلة تُضرَب ببعضها كما تقول القاعدة رقم 3، ويجب أن نكون حذرين جداً عند تطبيق التعاريف العملياتية. وهكذا فحين نلعب بالنرد، من الضروري هز النرد جيداً داخل القمع المستعمل بين كل رميتين متتاليتين بحيث يمكننا اعتبار الرميات مستقلة.

جيد جداً: نعلم الآن كيف نتلاعب بالاحتمالات، ولكننا لم نشر إلى ما يوافقها عملياتياً ! إذن هذه هي القاعدة لحساب احتمال الحدث (A) : تقوم بعدد كبير من التجارب المستقلة واضعاً نفسك في شروط إمكانية تحقق الحدث (A)، وتلاحظ ما هي نسبة تحقق الحدث (A) فعلياً. هذه النسبة هي احتمال الحدث (A) (بالنسبة للرياضي فإن "العدد الكبير" هو عدد يمكن جعله يسعى إلى اللانهاية). إذا رمينا مثلاً قطعة نقود عدداً كبيراً من المرات فإنها ستقع على الوجه الطرة في ما يقارب نصف الحالات وهذا ما يوافق احتمالاً 0.5..

أما وقد قدمنا هذا التعريف العملياتي الجميل، يمكن أن نتساءل ماذا يعني احتمال الحدث "ستمطر بعد الظهر"؟ في الحقيقة من

الصعب تكرار "بعد الظهر" عدداً كبيراً من المرات المستقلة! بعض المثاليين يقولون إن الاحتمال المذكور لا معنى له، ولكن من الممكن أن نجعل له معنى، مثلاً بعمل عدد كبير من عمليات المحاكاة العددية على الحاسوب (متوافقة مع ما نعرفه عن الحالة الجوية)، وبملاحظة ما هي نسبة الحالات التي تعطي فيها المحاكاة حدوث سقوط مطر. إذا وجدنا أن هنالك احتمال تسعون بالمئة لسقوط المطر فإنه حتى المثاليين سيأخذون مظلاتهم معهم.

الفصل الرابع

اليانصيب وكشف الطالع

لقد قدمت الاحتمالات في الفصل السابق مع قواعد رياضية أساسية، ومع تعاريف عملياتية، إلخ، أي باختصار مع مجموعة غنية من الاحتياطات التي يمكن أن تكون غير ضرورية. يمكن في النهاية تلخيص ما قلته كالتالي: تُجمع احتمالات الحوادث الغير متوافقة (لحساب احتمال الحدث "A أو B")، أما احتمالات الحوادث المستقلة فتضرب ببعضها (لحساب احتمال الحدث "A و B")، وتُعبِّر نسبة الحالات التي يتحقق فيها حدث (في عددٍ كبير من التجارب المستقلة) عن احتمال وقوع ذلك الحدث. إذا تأملنا النتائج السابقة قليلاً فإنها تظهر واضحةً بداهةً ولا تستدعي أي جدال، لكن بالرغم من ذلك فإننا عندما نلاحظ حالات نجاح اليانصيب وكشف الطالع مثلاً فإننا نقيس مدى اختلاف تصرف كثير من البشر فيما يتعلق بالاحتمالات عن ما هو معقول علمياً.

إن اليانصيب هو نوعٌ من الضريبة الموافق عليها بحرية من قِبَل الطبقات الأقل غنىً في المجتمع، حيث يشتري الإنسان قليلاً من الأمل

بثمن ليس غالٍ. احتمال ربح الجائزة الكبرى هو احتمال ضعيف جداً: هذا نوع من الاحتمالات التي تهمل في أغلب الأحيان (من مثل احتمال تلقي ضربة قاتلة خلال السير في الشارع). وفي الحقيقة لا تعوِّض الأرباح، صغيرةً كانت أم كبيرةً، في الوسطي قيمة البطاقات المُشتراة، ويُظهِر حساب الاحتمالات عملياً أن الخسارة واقعةٌ بالتأكيد إذا ما تابع الإنسان اللعب بشكل دوري. لنأخذ مثالاً ليانصيب مبسط قليلاً حيث احتمال الربح هو عشرة بالمئة، ومقدار الربح هو خمسة أضعاف المبلغ الأساسي المرهون، بعد إجراء عدد كبير من السحوبات تكون نسبة حالات الربح هي قريبة من عشرة بالمئة وحيث أن الربح هو خمسة أضعاف المبلغ الأساسي فإن الربح النهائي هو نصف المبلغ المصروف. وهكذا فإننا كلما أكثرنا من شراء البطاقات كلما خسرنا أكثر، وهذا يبقى صحيحاً في حالة يانصيب أكثر تعقيداً، حيث أن كل أنواع اليانصيب مصممة لنتف ريش اللاعبين لصالح منظم اليانصيب.

أريد الآن الانتقال إلى مناقشة كشف الطالع، وهنا سأحتاج لاستخدام إحدى قواعد حساب الاحتمالات، والتي ليست هي في الحقيقة إلا إعادة صياغة للقاعدة 3 من الفصل السابق، وهي:

4- إذا كان (A) و(B) مستقلان، عند ذاك يكون:

احتمال (الحدث"B" علماً أن الحدث "A" قد تحقق)= احتمال ("B")

بقولٍ آخر إن معرفة تحقق "A" لا تعطينا أية معلومة عن "B"، حيث يبقى احتمال تحققه مساوياً لاحتمال "B"، وهذا يتناسب تماماً مع

الفكرة البديهية عن الحوادث المستقلة. عندما لا تكون الحوادث مستقلة نقول إن بينها رابطة أو أنها مترابطة corrélé، وقد تم إيراد برهان[2] القاعدة رقم (4) بشكلٍ مفصل للقارئ المهتم.

يمكننا الآن بحث مشكلة كشف الطالع والتي هي أدق وأكثر إثارةً للاهتمامِ من اليانصيب، وحيث لا نرى هنا أين تكمن الاحتمالات. بشكلٍ نمطي، يؤكد كشف الطالع لك أنك إذا كنت من برج الأسد فإن تشكيلة الكواكب هي ملائمة لك في هذا الأسبوع، وأن لك حظاً في الحب وفي اللعب هذا الأسبوع، أو أنك من برج الحوت عليك تحاشي السفر بأي شكل والبقاء في البيت والاعتناء بصحتك. وعلى هذا يضيف الفيزيائيون والفلكيون أن الحدث "س هو من برج الأسد" والحدث "س سيربح في اللعب هذا الأسبوع" هما حدثان مستقلان تماماً. وكذلك الحال بالنسبة للحدثين: "س من برج الحوت" و"س سيعاني أو (ستعاني) إذا سافر هذا الأسبوع"، وفي الحقيقة من الصعب تخيل مثال أجمل لأشياء لا علاقة لأحدها بالآخر، وهي بالتالي مستقلة تماماً بلغة نظرية الاحتمالات. ويمكننا تطبيق القاعدة (4) السابقة والاستنتاج منها أن احتمال أن "س" سيربح هذا الأسبوع في اللعب هي نفسها إن كان "س" من برج الأسد أم لم يكن. بالإضافة إلى ذلك فإن مخاطر السفر هي نفسها للذي هو من برج الحوت أو لأي برج من الأبراج، وهكذا فإن كشف الطوالع هو بدون فائدة بتاتاً.

لكن هل انتهى الموضوع بهذا الشكل؟ ليس بعد، لأن من يعتقدون بعلم الأفلاك ينفون تماماً أن يكون "س من برج الأسد" وأن "س سيربح هذا الأسبوع في اللعب" هما حدثان مستقلان؛ ويذكرون قائمة طويلة من الفلكيين المشاهير والذين كانوا أيضاً يؤمنون بالأفلاك: هيبارك، بطليموس وكيبلر مثلاً، والطريقة الوحيدة للفصل في الجدال هي طريقة تجريبية: هل يوجد علاقة ذات معنى بين كشف الطوالع والواقع؟ الجواب هو بالنفي، وهذا ما يطعن بالتنجيم تماماً. ومع ذلك فإن الطعن بالتنجيم في الأوساط العلمية له سبب آخر: لقد غير العلم فهمنا للعالم، بحيث أن الارتباطات التي كان من الممكن تصورها في الماضي أصبحت لا تتناسب مع معلوماتنا الحالية عن تركيب العالم وعن قوانيننا الفيزيائية. يمكن للتنجيم وكشف الطالع أن يجدا مكاناً لهما في علوم الأقدمين، ولكنهما لا يدخلان في إطار العلم الحديث.

ولكن الموقف ليس بهذه البساطة ويتطلب مناقشة أكثر جدية. بسبب القوى (الجاذبية العامة) التي توجد بين الأجسام فإن الزهرة و عطارد و المريخ و زحل تؤثر على أرضنا الطيبة القديمة. بكل تأكيد هذا التأثير ضعيف جداً، ويمكن الافتراض أن تأثيرها على مشاغل البشرية هو مهمل تماماً، إلا أن *هذا* ***غير صحيح***! فبعض الظواهر الفيزيائية، مثل الطقس، تظهر حساسيةً كبيرةً للاضطرابات، بحيث أن سبباً بسيطاً يمكن أن تكون له نتائج كبيرة بعد مرور بعض

الوقت. لذا يمكن تصور أن وجود الزهرة، أو أي كوكب آخر يمكن أن يغير في تطور حالة الطقس، مما سيكون له نتائج ليست مما يمكن إهماله بالنسبة لنا. وكما سنرى فإن الاختصاصين يقدّرون أن الأمر هو كذلك، وأن واقعة "أنها ستمطر" أو "لن تمطر بعد الظهر" تعتمد -بالإضافة إلى عوامل أخرى- على تأثير جاذبية الزهرة منذ عدة أسابيع! بالإضافة إلى ذلك فإن الجدال نفسه الذي يؤكد على تأثير الزهرة على الطقس هو نفسه الذي يمنعنا من معرفة، ما هو هذا التأثير. وبقول آخر إن واقعة "أنها ستمطر بعد الظهر اليوم" وواقعة "أن الزهرة هي هنا أو هناك" تبقى واقعتان مستقلتان حسب ما يعنيه هذا بالنسبة لنظرية الاحتمالات. يتفق كل هذا مع البديهة، ولكنه أكثر مكراً مما يمكن تصوره بشكل عفوي (انظر المناقشة في الملاحظة رقم 3).

لنتابع تحليلنا: لو وضعنا الأحوال الجوية جانباً، أليس من الممكن أن يكون للكواكب تأثيرٌ على أحوالنا، وحيث يكون تأثيرها أكثر توجيهاً؟ لنتصور فلكياً مختلاً قليلاً، بحيث يقوم بناءً على مراقبات لكوكب الزهرة بجرائم سادية: هذا ما يعطي ترابطات هامة مع بعض كشوف الطوالع! إن هذا الاقتراح ليس سخيفاً تماماً: فلقد كان قدماء المايا، المراقبون الدقيقون لدورات الزهرة، محبين جداً لتقديم القرابين البشرية، (كانوا يفتحون صدر الضحية بسكين، وينتزعون القلب ثم يحرقونه بعد ذلك). وهكذا فإن تدخل الذكاء الإنساني يقدم آليّة يمكن أن تُدخِل علاقات بين "الحوادث" التي لا علاقة بين

بعضها البعض بالأساس، فكيف نعرف حينذاك أي الحوادث هي فعلاً مستقلة؟

الحقيقة أن الفيزيائي المعاصر يملك فضيلة المعرفة المفصّلة للعالم وللقوانين التي تحكمه، ولديه أفكار دقيقة عن الترابطات التي يمكن أن توجد، إنه يعرف مثلاً أن سرعة التفاعل الكيميائي يمكن أن تتأثر بشدة بوجود قليل من الشوائب، ولكن ليس بطور القمر، وفي الحالات المبهمة فإنه يتحقق من ذلك. إن الترابطات corrélation غير المتوقعة، والتي يمكن أن تنتج عن تدخل وسائط ذكية، يمكن أن تخضع للتحليل هي أيضاً. "إذا كنت من برج الأسد، فإنك محظوظ في الحب وفي اللعب هذا الأسبوع"، ما علاقة أطوار الزهرة بالحياة الخاصة لشخص ما (س) يا قارئ أو قارئة كشف الطالع؟ كما رأينا فإن هذه الترابطات ليست مستحيلة تماماً، إذا أخذنا في الاعتبار أنها تستدعي تدخل عاملٍ واعٍ (كاهن من المايا، أو فلكي مختل)، وفي الحالات الأخرى يمكن استبعادها تماماً. لقد ملأ القدماء العالم "بالعملاء الأذكياء": آلهة، وجان وشياطين، تلك التي قتلها العلم فيما يشبه المذبحة. لقد ماتت الآلهة..... والتدخل البشري لا يمكنه أن يزيد من "احتمالات الربح في اللعب" لـ س من الناس (الغش غير مقبول). يمكننا التأكيد إذن أن "كونك من برج الأسد" و"إمكانية الربح في اللعب هذا الأسبوع" هما حدثان مستقلان، ويؤكد ذلك الإحصاء، لكن ما هو الحال بالنسبة للحظ في الحب؟ ليس التدخل البشري هنا ممكن

فقط، ولكنه مؤكد، إنه تدخل من الفرد (س)، حتى وإن كان أو (كانت) قليل الإيمان بهذا الأمر. هكذا نحن، إن اعتقادنا بأن لنا "حظاً في الحب" في هذا الأسبوع يزيد من ثقتنا بأنفسنا، وبالتالي يزيد من حظنا.

من الواضح أن قراراتنا هي لا عقلانية في الأغلب، مستندة إلى مصادفات عفوية نعتبرها "إشارات أو نبوءات"، وهذا التصرف اللاعقلاني هو بعيد عن أن يكون ضاراً في مطلق الأحوال: تحاشي المرور من تحت السلم هو من الاعتقادات الزائفة ولكن ذلك من الحيطة أيضاً. بالإضافة إلى ذلك، تظهر نظرية اللعب أنه من الأفضلية أخذ بعض القرارات بشكل عشوائي، وأخيراً فإنه من التوهم أن نظن أننا نستطيع اتخاذ جميع قراراتنا بشكل عقلاني.

ومع ذلك، فإن معرفة أفكار صحيحة عن الاحتمالات تجعلنا نتحاشى بعض الحماقات الكبيرة. نتألم حين نرى الناس الأقل إمكانية لفقد المال يفقدونه في اليانصيب، وبالنسبة لكشف الطوالع اعترف أنني أقرؤها من حين إلى آخر بلذة، فهناك ما يشبه الشعر في توقعات السفر البعيد، واللقاءات الرومانسية، ووراثة تركة خيالية تظل هذه التنبوءات بريئة إذا لم يؤمن الإنسان بها كثيراً، غير أننا نستهجن عندما نرى بعض الشركات توظف بعض الأشخاص على أساس كشف الطالع، وهنا يوجد ما هو أكثر من الحماقة: إن هذا التمييز "الكوكبي" هو لؤم.

الفصل الخامس

الحتمية الكلاسيكية

إن مرور الزمن هو مظهرٌ أساسي لإدراكنا للعالم، ولقد رأينا أن *المصادفة* هي مظهر أساسي آخر من مظاهرِ هذا الإدراك، لكن كيف يتمفصل هذان المظهران؟ قبل أن نرمي قطعة نقود في الهواء، يمكن أن أقدر أن احتمالي أن تقع طرّة أو نقش هما مساويان لخمسين في المئة لكل منهما. بعد ذلك أرمي القطعة، فتقع لنقل على الوجه الطّرة. في أية لحظة قررت القطعة أن تقع على وجه الطرّة؟ لقد طرحنا على أنفسنا سابقاً هذا السؤال، والجواب ليس سهلاً: نحن نجد أنفسنا أمام واحدة من "أجزاء الواقع" الموصّفة بعدة نظرياتٍ فيزيائية مختلفة، والصلة بين هذه النظريات المختلفة معقدةٌ نوعاً ما. لقد ناقشنا النظرية التي توّصف المصادفة وهي: النظرية الفيزيائية للاحتمالات، أما لتوصيف الزمن فإن الأمور عندها تبدأ بالتعقد، لأن لدينا نظريتان مختلفتان تحت تصرفنا على الأقل هما: الميكانيك *الكلاسيكي* والميكانيك *الكمومي*.

سنتناسى لبرهة لعبة الطرة والنقش، ولنتكلم الآن عن الميكانيك. إن طموح الميكانيك -كلاسيكياً كان أم كمومياً- هو

أن يخبرنا كيف يتطور العالم مع مرور الزمن. من واجب الميكانيك أن يصف لنا حركة الكواكب حول الشمس، وحركة الإلكترونات حول النواة في الذرة. ولكن بينما يعطي الميكانيك الكلاسيكي نتائج جيدة فيما يتعلق بالأشياء الكبيرة، نجده غير ملائم على المستوى الذري، ويجب أن يُستبدل بالميكانيك الكمومي. إذن فالميكانيك الكمومي أصح من الميكانيك الكلاسيكي، ولكنه أصعب معالجة. بالإضافة إلى ذلك، لا يمكن تطبيق الميكانيك الكلاسيكي ولا الكمومي على الأشياء التي تكون سرعتها قريبة من سرعة الضوء: يجب في هذه الحالة أن نستدعي النظرية النسبية لأنشتاين (النظرية الخاصة، أو العامة إن أردنا أن نصف أيضاً الجاذبية).

ولكن يمكنك التساؤل: لماذا التوقف عند الميكانيك الكلاسيكي أو الكمومي؟ أليس من الأفضل أن نهتم بالميكانيك *الصحيح*، الذي يوّحد كل الظواهر الكمومية والنسبية؟ إن ما يهمنا في النهاية هو العالم كما هو في الحقيقة، وليس ذلك التجريد الكلاسيكي أو الكمومي. إن السؤال مهم جداً، ويستحق أن نتوقف عنده قليلاً، علينا أن نلاحظ أولاً أنه ليس في حوزتنا ***الميكانيك الصحيح***: ليس لدينا حتى هذا اليوم نظريةٌ موّحدة تأخذ بالحسبان كل ما نعلمه عن العالم الفيزيائي (نسبية، كوانتا، خواص الجزيئات الأساسية، والجاذبية). إنّ حلم كل فيزيائي أن يرى يوماً ما نظرية كهذه "قيد العمل"، ولكننا لسنا في هذه الحالة الآن. وحتى لو كانت

إحدى النظريات العديدة المقترحة تظهر وكأنها المطلوبة، فإنها ليست "قيد العمل" الآن، بمعنى أنها لا تأخذ بالاعتبار كتل الجزيئات الأساسية، وتفاعلاتها إلخ، لذا نجدنا مضطرين لاستعمال ميكانيك تقريبي نوعاً ما. سنستخدم في هذا الفصل الميكانيك الكلاسيكي، وسنرى في فصلٍ لاحق أن الميكانيك الكمومي يستخدم تصورات فيزيائية أكثر صعوبةً لإدراكها بداهةً، وبالتالي ستكون مناقشة علاقات الميكانيك الكمومي مع المصادفة أكثر صعوبة. كل هذا يشير إلى أن ***الميكانيك الصحيح*** يوظف تصورات فيزيائية ليست بالبديهية: وهذا سبب إضافي لاستخدام الميكانيك الكلاسيكي -ذو التصورات الفيزيائية المألوفة- لبحث تمفصل المصادفة والزمن.

لقد رأينا أن طموح الميكانيك هو وصف كيفية تطور العالم مع تيار الزمن. بين أشياء أخرى، يريد الميكانيك أن يصف دوران الكواكب حول الشمس، كيفية تحرك مركبة فضائية بتأثير دفع الصواريخ، والطريقة التي يسيل فيها سائل لزج، باختصار نريد أن نوصِّف ***التطور الزمني*** للمنظوماتِ الفيزيائية، وقد كان نيوتن أولَ من فهم كيف يمكن فعل ذلك. باستخدام لغةٍ أكثر حداثة من لغة نيوتن نقول إن ***حالة*** منظومة في لحظة معينة هي مجموعة المواقع والسرعات للنقاط المادية المكونة للمنظومة، من الواجب إذن إعطاء مواقع وسرعات الكواكب، وكذلك المركبة الفضائية التي نهتم بها وكذلك مواقع وسرعات نقاط السائل اللزج الذي يسيل (في هذه الحالة الأخيرة هناك عددٌ لانهائي من النقاط، أي من المواقع والسرعات).

بحسب ميكانيك نيوتن، عندما نعرّف حالة منظومة فيزيائية (المواقع والسرعات) في لحظة معينة -ندعوها اللحظة الابتدائية- فإنه يمكننا استنتاج حالتها في أية لحظة أُخرى. سأعطي مخططاً لطريقة الوصول لذلك، تستدعي هذه الطريقة مفهوماً جديداً: هو *القوى* المؤثرة على المنظومة. من أجل منظومة معينة، تتعين القوى المؤثرة عليها في كل لحظة بحالة المنظومة في تلك اللحظة، فمثلاً تتناسب القوة الجاذبة بين جسمين سماويين مع مقلوب مربع البعد بينهما. ويشير نيوتن أيضاً كيف أن تغير حالة منظومة ما خلال الزمن محكومٌ بالقوى التي تؤثر على هذه المنظومة (وهذا موضح بصورة دقيقة بمعادلة نيوتن[1]). وهكذا فإن معرفة حالة منظومة في اللحظة الابتدائية، تمكننا من حساب تغير حالتها مع مرور الزمن، وفي النتيجة معرفة حالتها في أية لحظة أخرى، كما قلنا سابقاً.

لقد عرضت في كلمات قليلة هذا الصرح الكبير للتفكير العمومي الذي هو الميكانيك النيوتوني، والذي يُدعى الآن أيضاً بالميكانيك الكلاسيكي. بالتأكيد، تتطلب دراسة جدية لهذا الميكانيك أدواتٍ رياضية لا يمكن تقديمها هنا، إلا أنه يمكننا أن نقدم بعض الملاحظات المهمة حول نظرية نيوتن، حتى دون الدخول في التفاصيل الرياضية. لنلاحظ أولاً أن هذه النظرية صدمت كثيراً من معاصريه، ديكارت خصوصاً، لم يتقبل فكرة "قوىً عن بعد" بين النجوم، ووجدها سخيفة وغير منطقية. بينما كانت وظيفة الفيزياء

بالنسبة لنيوتن لصق نظرية رياضية على جزء من الواقع بحيث تتوافق مع ملاحظاتنا، وجد ديكارت أن خطة كهذه هي خطةٌ جبانة، لقد رغب بشرح *ميكانيكي*، يقبل قوى تماس من مثل مسنن يدير مسنناً آخر، ولكن لا قوى عن بعد. لقد أعطى تطور الفيزياء الحق لنيوتن وليس لديكارت، وماذا كان هذا الأخير سيقول عن ميكانيك الكم حيث تستحيل معرفة موقع وسرعة الجزيئات معاً؟

و لكن لنعد إلى الميكانيك النيوتوني وإلى الصورة الحتمية التي يعطيها للعالم: إذا عرفنا حالة العالم في لحظة ابتدائية (هي اختيارية)، يمكننا أن نحدد حالته في أية لحظة أخرى. لقد أعطى لابلاس للحتمية صياغةً أنيقة سأنقلها هنا(2):

"بفرض وجود ذكاء يعرف في أيّة لحظة معينة كل القوى الفاعلة في الطبيعة وحالة كل الكائنات التي تشكلها، وإذا كان هذا الذكاء بهذه الشمولية بحيث يُخضع كل هذه المعطيات للتحليل، ويختصر في علاقة واحدة حركات كل الأجرام الكبيرة في الكون وتلك التي لأصغر الذرات، فإنه لا يبقى أي شيء غير مؤكد لهذا الذكاء، ويكون المستقبل كما الماضي حاضراً أمام عينيه. لقد قدمت الروح البشرية بالكمال الذي أعطته لعلم الفلك مخططاً أوليّاً لهذا الذكاء".

لهذا القول المنقول عن لابلاس نكهة دينية، ويستحث في كل الأحوال أسئلة متعددة، فأيُّ مكانٍ تتركه الحتمية للخيار الحر

للإنسان؟ أي مكان تتركه للمصادفة؟ لا نريد إيضاح مشكلة حرية الاختيار بشكل مفصل، ولكننا سنتفحصها بعد قليل، ولنهتم الآن بالمصادفة.

تُظهِرُ لنا الرؤية القريبة أن الحتمية اللابلاسية لا تترك مكاناً للمصادفة: إذا رميت قطعة نقود في الهواء، فإن قوانين الميكانيك الكلاسيكي تحدد بالأساس وبحتمية إذا كانت ستقع على وجه الطرة أو النقش، لكن حيث أن المصادفة والاحتمالات تلعب دوراً كبيراً في فهمنا للطبيعة، فإننا سنميل إلى رفض الحتمية. وفي الحقيقة وكما سنرى فإنّ الإشكالية مصادفة/حتمية هي مسألة وهمية، وسأشير فيما يلي إلى الطريقة للخروج منها، تاركاً للفصول القادمة دراسةً أكثرَ تفصيلاً.

في البداية، ليس هناك أي عدم توافق منطقي بين المصادفة والحتمية، حيث أن الحالة الابتدائية للمنظومة في اللحظة الابتدائية بدلاً من أن تكون معينةً بطريقة دقيقة يمكن أن تُوزَّع بحسب قانونٍ للمصادفة. إذا كان الوضع كذلك، فإن للمنظومة في أية لحظة أخرى توزيع حسب المصادفة، ويمكن استنتاج هذا التوزيع من التوزيع في اللحظة الابتدائية، بفضل قوانين الميكانيك. لا يمكننا من الناحية العملية معرفة حالة المنظومة في اللحظة الابتدائية بدقة تامة، وبقولٍ آخر فإننا نقبل دوماً بشيء من المصادفة في الحالة الابتدائية للمنظومة، وسنرى أن هذا القليل من المصادفة في الحالة الابتدائية يمكن أن

يعطي الكثير من المصادفة (أو اللاتعيين) في لحظة تالية، وهكذا يمكننا أن نرى أن الحتمية في الواقع لا تستبعد المصادفة. أكثر ما يمكن أن نقوله -إذا أردنا ذلك- أننا يمكن أن نقدم الميكانيك الكلاسيكي دون التعرض للمصادفة، وسنرى لاحقاً أن هذا غير صحيح بالنسبة للميكانيك الكمومي. وهكذا فإن تمثيلين مختلفين للواقع يمكن أن يتباعدا كثيراً من حيث التصورات والمفاهيم، رغم أن توقعاتهما يمكن أن تكون متطابقة بالنسبة لنوع كثير من الظواهر.

لقد كانت العلاقة بين المصادفة والحتمية مجال نقاشات عديدة، ومثار جدل بين رينيه توم وإليا بريغوجين حديثاً[3]. تتعارض آراء هذين الكاتبين تعارضاً تاماً، ولكن بالرغم من ذلك يجب أن نرى أن تباعد آرائهما لا يشمل تفاصيل الظواهر الملاحظة (كان العكس يمكن أن يكون أكثر إثارة). لنلاحظ تأكيد توم أنه حيث أن طبيعة العلم هي صياغة القوانين، فإن أي دراسة لتطور الكون ستنتهي بالتأكيد إلى صياغة حتمية، ولنلاحظ مع ذلك أن تلك الصياغة الحتمية ربما لا تتعلق بحتمية لابلاس، ولكن-على سبيل المثال- بالقوانين "الحتمية" التي تحكم تطور التوزيعات الاحتمالية، وهكذا نلاحظ أنه لا يمكن التخلص بسهولة من المصادفة! مع ذلك فإن ملاحظة توم مهمة بالنسبة لعلاقة مسألة حرية الإرادة بالإشكالية مصادفة/حتمية، ما يقوله لنا توم باختصار أنه **لا يمكن توقع حل مسألة حرية الاختيار باختيار**

ميكانيك معين بدلاً من آخر، حيث أن أي ميكانيك هو بطبيعته حتمي.

ها قد وصلتُ إلى مواجهة المشكلة الشائكة لحرية الاختيار. أريد في البداية أن أعرض باختصار الرأي الذي يدافع عنه بالنسبة لهذا الموضوع أروين شرودينغر، أحد مؤسسي ميكانيك الكم[4]. لقد حركت الوظيفة التي تركها ميكانيك الكم للمصادفة الأمل -كما يلاحظ شرودينغر- بأن يكون هذا الميكانيك الجديد أكثر تلاؤماً مع أفكارنا عن حرية الاختيار من الحتمية اللابلاسية. إن هكذا أمل ما هو إلا خداع، كما قال شرودينغر. بدايةً، يلاحظ شرودينغر أن حرية اختيار *الآخرين* لا تكوّن مشكلة؛ إذ ليس من المزعج رؤية تفسير حتمي لكل قراراتهم، إن ما يخلق المشكلات هو التناقض الظاهري بين الحتمية وحرية اختيار*نا* المتصفة بشكلٍ مسبق بأن ***عدة إمكانيات*** مفتوحة أمامنا وأننا نستخدم *مسؤوليتنا* حين نختار إحداها. إن إدخال المصادفة في القوانين الفيزيائية لا يساعدنا بأي شكل على حل التناقض، لأنه هل يمكن القول بأننا نوظف مسؤوليتنا بإجراء اختيار مصادفة؟ إن حرية اختيارنا هي على الغالب وهمية. إذا حضرت مأدبة رسمية كما قال شرودينغر، مع شخصيات مهمة ومضجرة، يمكن أن تفكر بالقفز على الطاولة وترقص كاسراً الأكواب والصحون، ولكنك لا تفعل ذلك، ولا يمكن هنا القول بحرية الاختيار. في حالات أخرى يؤخذ بقرارٍ مسؤول، وربما مؤلم: اختيار كهذا ليس له

بالتأكيد خصائص المصادفة. في النتيجة لا تساعدنا فكرة المصادفة على فهم حرية الاختيار، وشرودينغر يؤكد أنه لا يرى تناقضاً بين حرية الاختيار وحتمية الميكانيك، إن كان كلاسيكياً أو كمومياً.

ترتبط المسألة الدينية القديمة *للقضاء والقدر* prédestination بحرية الاختيار. هل قدّر الله مسبقاً من هي الأرواح الناجية ومن هي الملعونة؟ هذا السؤال هام جداً بالنسبة للأديان المسيحية. إن ما يعارض حرية الخيار الإنساني ليس حتمية الميكانيك، بل كلية العلم والقدرة الإلهية. يَظهرُ رفضُ القضاء والقدر كأنه حدٌّ من القدرة الكلية، كما أن القبول به يجعل أي جهدٍ أخلاقي يبدو عبثياً وبلا أي معنى. لقد دافع القديس أوغسطين (354-430) عن عقيدة القضاء والقدر، وكذلك فعل القديس توما الأكويني (1225-1274)، وأيضاً المصلح البروتستانتي جان كالفن (1509-1564)، وكذلك الجانسنين في القرن السابع عشر، أما الكنيسة الكاثوليكية فلقد بقيت حذرة رسمياً، وتحاشت البت بأي رأي متطرف حول القضاء والقدر. واليوم تظهرُ لنا المناقشات حول القضاء والقدر، والتي كانت محور الحياة الثقافية قديماً، بعيدة، وتغطي الآن رمال النسيان آلاف صفحات الجدال اللاهوتي باللاتينية الوسيطة. لم تحل المسائل القديمة ولكن معانيها تحللت، أصبحت منسية وهي تختفي

إن آرائي حول حرية الاختيار متعلقة بمشاكل **الحسوبية** ***calculabilité*** التي سنناقشها في الفصول القادمة.لنحاول حل الإشكال

التالي: لنفرض وجود أحد ما لندعوه المتنبئ، يستعمل حتمية القوانين الفيزيائية للتنبؤ بالمستقبل، وبعد ذلك يستعمل حرية اختياره ليعارض توقعاته نفسها. يَظهرُ هذا الإشكال بشكلٍ حاد في بعض روايات الخيال العلمي، حيث يكون المتنبئ قادراً على تحليل المستقبل بدقة لاتصدق. لكن كيف يمكننا أن نحل هذه الإشكالية؟ يمكننا التخلي إما عن الحتَمية أو عن حرية الاختيار، هناك إمكانية ثالثة: يمكننا أن نرفض أن يكون لأيٍّ كان قوة تنبؤية بحيث تخلق إشكالاً. لنلاحظ أن متنبئنا يجب أن ينتهك تنبؤاته نفسها في ما يتعلق بمنظومة ما، ولكي يؤثر على هذه المنظومة، يجب أن يجعل نفسه جزءاً منها. هذا يعني أن المنظومة بدون شك معقدة، ولكن التنبؤ الدقيق بمستقبل منظومة يجازف بتطلب جهدٍ حسابيٍ كبير، يتجاوز بهذا قدرات أيّ متنبئ. أعترفُ بأن المحاكمة التي قدمتها مختصرة نوعاً ما، لكنني أعتقد أنها تتعرف على السبب (أو أحد الأسباب) الذي يمنعنا من التحكم بالمستقبل. تؤدي نظرية اللاتمامية لغودل إلى وضعٍ مشابه (ولكن ضمن إطار أكثر دقة). في هذه الحالة أيضاً، يسمح تحليل مفارقة (paradoxe) معينة بإظهار أنه لا يمكننا الإقرار في ما إذا كانت بعض المقولات (assertion) صحيحة أو غير صحيحة، لأن الطريق للوصول إلى قرارٍ decision محدد، طويلةٌ بشكل مستحيل. باختصار: إن ما يشرح حرية اختيارنا، وما يجعل منها فكرة مفيدة هو تعقيد العالم، أو بالأحرى تعقيدنا نحن.

الفصل السادس

ألعــاب

لأحجار الزهر المألوفة ستةُ أوجهٍ متكافئة ومرقمة من الواحد وحتى الستة، وللحصول على أرقام بالمصادفة au hasard من العملي أن تكون الأحجار ذات عشرة وجوه متكافئة مرقمة من الصفر وحتى التسعة. وفي الحقيقة، لا يوجد كثير وجوه منتظم ذو 10 وجوه، لكن هناك ما هو ذو عشرين وجهاً (l'icosahèdre) ويمكن وضع نفس الأرقام على الوجوه المتقابلة. إن أية رمية للحجر تعطي رقماً بين 0 و9 ولكل رقمٍ ذاتُ الاحتمال بالظهور: 1/10. ومن الممكن العمل بحيث تكون الرميات المتتالية مستقلة، والحصول بهذه الطريقة على سلسلة أرقامٍ عشوائية مستقلة. يمكننا بتطبيق نظرية الاحتمال على لعبة الزهر تلك، حسابُ عدة احتمالاتٍ مختلفة، وذلك كما رأينا سابقاً. فمثلاً إن احتمال "أن يكون مجموع ثلاثة أرقام متتالية هو 2" هو: 1000/ 6 [1].

كل هذا غير مثير أبداً، ويمكن أن تفاجأ عندما تعلم أنه توجد قوائم مطبوعة "للأرقام العشوائية"، أي لائحة أرقام كمثل الآتية: 7213773850327333562180647000.... وتظهر لائحة كهذه وكأنها

شيء غير مفيد بشكل ملحوظ، ولكن الرحلة الصغيرة التي سنقوم بها في ***نظرية الألعاب*** ستبرهن لنا العكس تماماً.

لدينا الآن لعبة معروفة، ليكن لدي كرة صغيرة يمكن لي أن أضعها في يدي اليمنى أو اليسرى (خلف ظهري)، وبعد ذلك أظهر لك يدي الاثنتين وعليك أن تخمن في أي يد خبأت الكرة. نعيد اللعبة عدة مرات ونسجل النتائج. وفي النهاية، نحسب المرات التي ربحت فيها أو خسرت، ونصفي الحساب بالنقود أو البيرة أو أي شيء آخر. افترض أن كلانا يحاول الربح وكلانا ماهر جداً، إذا وضعت الكرة دوماً في نفس اليد، أو إذا غيرت بشكل منتظم، فإنك ستلاحظ ذلك وستربح. في الحقيقة، إنك ستكتشف أية إستراتيجية أقوم بها. هل يعني ذلك أنك ستربح حتماً دوماً؟ لا! إذا وضعت الكرة بالمصادفة في أي يد فالاحتمال هو $\frac{1}{2}$ وإذا كانت خياراتي التالية مستقلة، فإنك ستعطي خياراً صحيحاً تقريباً مرة من كل اثنتين، ووسطياً لن تربح ولن تخسر.

إن حقيقة أنك تعطي جواباً صحيحاً تقريباً مرة من كل اثنتين (أي باحتمال $\frac{1}{2}$) هو واضح تماماً. هذا ينتج من أن اختيارك، واختياري لليد التي أضع فيها الكرة هما ***حدثان مستقلان***. لنلاحظ أنه لايكفي أن أضع الكرة في يدي اليمنى أو اليسرى "بشكل أو بآخر بالمصادفة". إن أي أفضلية لأي يد أو أية ترابط corrélation بين الخيارات المتتالية ستستخدم ضدي، وستسمح لك بالربح على المدى الطويل.

بالطبع إنني ماهر جداً، ويمكنني أن أحرضك على أن تأخذ خياراً خاطئاً، وأجعلك تخسر، ولكنك تستطيع أن تتحاشى بسهولة هذا الموقف باتخاذ قراراتك بالمصادفة.

والسؤال الآن هو كيف أقوم بخياراتٍ متتاليَة ومستقلة لليد اليسرى أو اليمنى وباحتمال ½. إذا كان لدي لائحة للأرقام العشوائية فإنني سأقرر أنه إذا كان العدد زوجياً فإنني سأستعمل اليد اليمنى، وإلا فسأستخدم لليد اليسرى، واللعبة ستتم. ومع ذلك يجب عدم نسيان شيء أساسي: إن اختياري ليدي وخيارك يجب أن يكونا حدثين مستقلين تماماً. لذلك يجب أن لا تعرف لائحة الأرقام العشوائية التي استعملها، وأن لا أعطيك أية إشارة إلى اليد التي أضع فيها الكرة، وخصوصاً يجب أن لا أعطيك أية رسالة تخاطرية يمكن أن تفيدك في اختيارك. لأجل هذه النقطة الأخيرة، أجريت عدة تجارب (من نوع اللعب الذي اهتممنا به) لم تكن نتائجها لصالح وجود التخاطر.

وهكذا يظهر أخيراً أن امتلاك لائحة أرقام عشوائية هو شيءٌ مفيد، لكن يبقى أن نعرف من أين نحصل على لائحة كتلك: سنعود إلى هذه المسألة لاحقاً، ولكن لنتفحص الآن بتمعنٍ أكثر نظرية اللعب.

إن فائدة التصرف العشوائي في بعض الألعاب (أو مواقف النزاع) هي ملاحظة مهمة، إن كان من وجهة النظر العملية أم الفلسفية، (تعود هذه الملاحظة للرياضي الفرنسي إميل بوريل والهنغاري-

الأمريكي يوهان فون نيومان). بالطبع من المستحسن التصرف بطريقة متوقعة عند التعاون مع شخص ما، ولكن في موقف تنافسي فإن التصرف العشوائي وغير المتوقع قد يكون أفضل استراتيجية. لنعتبر لعبة بين شخصين (أنت وأنا) حيث لأيٍّ منا حرية الاختيار ما بين عدة "ضربيات" ويتخذ قراره دون معرفة ماذا يفعل الآخر، وبنتيجة الاختيارين سيربح أحدنا مبلغاً من المال، وعلى الآخر دفعه. مثلاً، لدي خياران: أن أضع الكرة في اليد اليمنى أو اليد اليسرى، وخياران لك: تخمين في أي يد توجد الكرة، وحسب ما إذا كان تخمينك صحيحاً أم خاطئاً، فإنك تتلقى مني أو تدفع لي فرنكاً أو أي مبلغ يتم الاتفاق عليه.

لننتقل إلى لعبة أكثر عسكرة: أنت في طائرة صغيرة تطير فوق ساحة المعركة وأنت تلقي قنابل محاولاً إصابتي، أما أنا فإنني اختبئ في أي ملجأ، وأحاول طبعاً اختيار أفضل ملجأ للاختباء. ولكنك بالطبع ستبحث عن أفضل ملجأ لتقصفه.... إذاً أليس من الأفضل لي في هذه الحالة أن اختبئ في ملجأ أقل جودة؟ إذا كان كلانا ماهراً، فإننا سنستخدم استراتيجيات احتمالية. من جهتي سأحسب احتمالات الاختباء في عدة ملاجئ، وسأختار الملجئ الذي يعطيني أكبر احتمال للبقاء. بعد ذلك ألعب بالطرة أو النقش، أو أستخدم لائحةً للأرقام العشوائية لاختيار مكان الاختباء، ومن جهتك أيضاً فإنك تحسب الاحتمالات، وتستعمل أيضاً لائحة للأرقام العشوائية لتقرر أين سترمي قنابلك مع أفضل احتمال لإصابتي. كل هذا يفتقد قليلاً إلى الحس

الصحيح؟ مع ذلك فإننا سنتصرف هكذا إذا كنا ماهرين ونتصرف "بعقلانية". يمكنك تحسين حساباتك إذا حصلت على معلومات عن مكان اختبائي، وبالعكس عليك منعي من معرفة رغباتك في قصفي.

في الحياة اليومية تجد الكثير من الأمثلة حيث رئيسك أو زوجتك أو حكومتك تحاول إدارتك. وهم يقترحون عليك لعبة تحت غطاء اختيار بين عدة إمكانيات حيث تظهر بوضوح إحداها وكأنها المفضلة. تختارها ويقترحون عليك لعبة جديدة وهكذا. وبسرعة، من خيار معقول إلى خيار آخر معقول، تجد نفسك في وضع غير سار مطلقاً: لقد وقعت في فخ. لتحاشي ذلك تذكّر أن التصرف بالقليل من المصادفة وبطريقةٍ عشوائية وغير متوقعة ربما كانت أفضل استراتيجية. ما تخسره بانتقائك لخياراتٍ ليست أمثلية ستربحه مضاعفاً باحتفاظك بالقليل من الحرية.

لا يكفي التصرف بعشوائية، بل يجب أيضاً أن يكون ذلك بحسب استراتيجية احتمالية دقيقة، بإدخال الاحتمالات التي سنحسبها الآن. لنحدد لعبة خاصة بإعطائنا لائحة أرباح (أو مدفوعات) من الشكل التالي:

		خياراتك 1	2	3	4
خياراتي	1	0	1	3	1
	2	-1	10	4	2
	3	7	-2	3	7

لدي خيارات عدة ممكنة (لنقل 3)، ولديك خيارات عدة ممكنة (لنقل 4) ونقوم بخياراتنا باستقلالية (هذه الخيارات من نوع اختيار ملجأ ما للاختباء فيه، أو اختيار ورقة لعب من أوراق الشدة). وعندما نقوم باختيارنا، أتلقى مبلغاً مقرراً من اللوحة السابقة، فمثلاً في حالة كان خياري هو 2 وخيارك هو 4 سأحصل منك (بحسب الجدول) على فرنكين تدفعها لي، أما إذا اخترتُ 3 وأنتَ 2 أحصل على ناقص فرنكين: أي أنه يجب علي أن أدفع لك فرنكين.

لنفترض إنني أتخذ خياراتي الثلاثة مستخدماً بعض الاحتمالات، وأنك تتخذ خياراتك الأربعة ببعض الاحتمالات. تحدد جميع هذه الاحتمالات ربحاً وسطياً معيناً سأحاول جعله أعظمياً بينما ستحاول أنت أن تجعله أصغرياً (يستعمل كلٌّ منا الاحتمالات لخدمته). لقد برهن فون نيومن J.von Neumann في سنة 1928 أن أكبر قيم لربحي من أجل أقل قيم لخسارتك تساوي لأقل قيم خساراتك من أجل أكبر قيم ربحي، وهذا ما يدعى بنظرية (2) théorème du minmax. هذا يعني حيث أن كلينا نبيهان فإننا سنتفق تماماً على مدى اختلافنا.

يبقى حسب نظرية Minmax أن نعين احتمالات خياراتي واحتمالات خياراتك، والقيمة الوسطى لربحي. وبدون الدخول في التفاصيل (انظر الملاحظة رقم 2)، لنلاحظ أن هذه مسألة تنتمي لنوع عام من المسائل يدعى بمسائل **البرمجة الخطية** programmation linéair وهذا النوع من المسائل ليس صعب الحل جداً عندما يكون عدد

خياراتي وعدد خياراتك صغيرين. وإذا كانت لائحة الأرباح كبيرة، ستصبح المسألة أكثر صعوبة. سنرى في الفصل 22 كيف نقدّر صعوبة مثل هذه المسائل.

لنلخِّص هذا الفصل: تُظهِرُ لنا نظريةُ الألعاب théorie des jeux أنه من المفيد أن يكون تحت تصرفنا لائحة للأرقام العشوائية. ولكن ربما كنا نعيش في عالم حتمي حيث لاشيء يحدث بالمصادفة، فما العمل إذن؟ يمكننا أن نرمي زهراً أو قطعة نقود ونؤكد أنه في ظروفٍ عملياتية مناسبة سيعطينا هذا لوائح عشوائية جيدة. ولكن أولاً وأخيراً يجب عليك التساؤل حول كيف تدخل المصادفة في هذه اللوائح؟ هذا أمر معقدٌ بعض الشيء، ويلزمنا عدة فصول لإيضاحه قليلاً.

الفصل السابع

الاعتماد الحساس على الشروط الابتدائية

تعرفون قصة مكتشف لعبة الشطرنج. لقد طلب الحكيم من الملك الذي أراد مكافأته أن يضعوا له حبة رز في أول مربع في الرقعة، ثم اثنتين في المربع الثاني، ثم أربع في المربع الثالث وهكذا، بمضاعفة عدد الحبات في كل مربع. لقد ظن الملك في البداية أن هذه المكافأة زهيدةٌ جداً، ولكنه اضطر للاعتراف فيما بعد أن كمية الحب المطلوبة كبيرة جداً بحيث ليس بإمكانه لا هو ولا أي ملك آخر في العالم تقديمها، وهذا سهل التحقق: إذا ضاعفنا كمية ما عشر مرات، فإن هذا يعادل ضربها بـ 1024 وإذا ضاعفناها عشرون مرة هذا يعادل ضربها بأكثر من مليون إلخ.

إذا تزايدت كمية بحيث تتضاعف بعد برهة، ثم تضاعفت مرة أخرى بعد مرور برهة مساوية وهكذا، نقول أن هذه الكمية **تتزايد أسياً**، وكما رأينا، ستصبح هذه الكمية كبيرة جداً. يدعى هذا التزايد الأسيّ أيضاً **بالتزايد بنسبة ثابتة**، وهكذا إذا أودعنا مبلغاً ما في البنك بنسبة ثابتة خمسة بالمئة، فإن المبلغ يتضاعف قليلاً في أكثر من أربعة عشر عاماً (إذا أمكن تناسي الضرائب والتضخم). هذا النوع

من التزايد طبيعيٌّ تماماً وكثيراً ما يلاحظ في العالم المحيط بنا ولكنه لا يدوم أبداً لمدة طويلة.

سنستعمل فكرة التزايد الأسي لنفهم ماذا يحدث عندما نحاول إيقاف قلم رصاص على رأسه؛ بدون غش فإنك لن تستطيع ذلك، هذا مفهوم. في الحقيقة لا يقع القلم أبداً في حالة التوازن تماماً، وأي حيد سيتسبب في وقوعه على هذا الجانب أو الجانب الآخر. إذا درسنا وقوع القلم حسب قوانين الميكانيك الكلاسيكي (وهذا ما لا نفعله)، نجد أنه يقع بسرعة أسيّة (تقريباً، أو على الأقل في بداية السقوط)، وهكذا تتضاعف زاوية انحراف القلم بالنسبة لوضع التوازن خلال برهة زمنية معينة، ومن ثم تتضاعف في البرهة التالية، وهكذا، وأخيراً نجد القلم وقد تمدد على الطاولة.

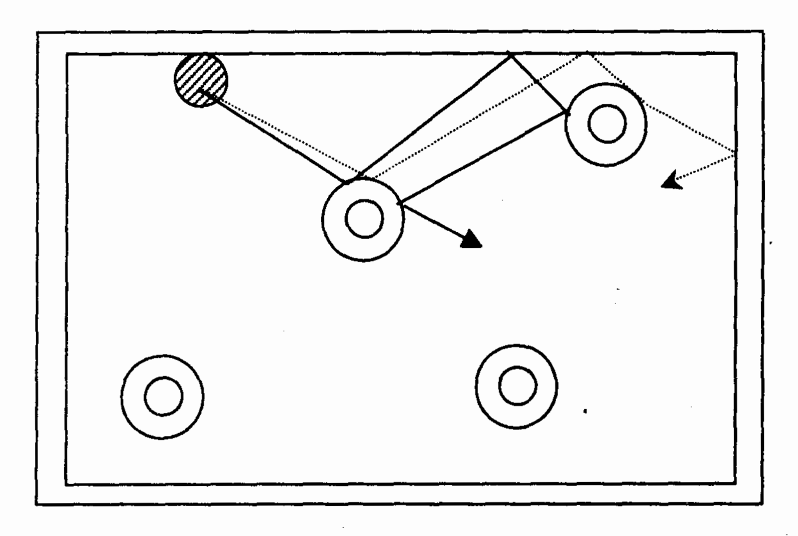
إن مناقشتنا لمثال القلم تعطينا مثالاً على حالة **الاعتماد الحساس على الشروط الابتدائية**، وهذا يعني أن تغيراً طفيفاً في حالة المنظومة في الزمن صفر (تغييراً طفيفاً في الوضع والسرعة الابتدائية للقلم) ينتج تغيراً لاحقاً يتزايد أسياً مع الزمن، وهكذا من سببٍ صغير (الدفع الطفيف للقلم يميناً أو يساراً) ينتج تأثيرٌ كبير. قد نظن أنه لكي يحدث هذا الشيء (أنّ يولّد سببٌ صغير تأثيراً كبيراً) يجب أن تكون هناك حالة خاصة في الزمن صفر، من مثل حالة التوازن القلق للقلم على رأسه، لكن العكسَ هو الصحيح: فالكثير من المنظومات الفيزيائية تعتمد بشكل حساس على الشروط الابتدائية، مهما كانت

هـذه الشـروط الابتدائية. بقـولٍ آخـر: أياً كـانت حالة المنظومة في الزمن صـفر، فـإن أي "دفـعٍ" قـليل إلى اليسـار أو الـيمين يُنـتِج آثـاراً هـامـة عـلى المـدى الطويـل. هـذا مـناقضٌ نوعـاً مـا للـبديهة، ولقـد احـتاج الرياضـيون والفيزيائيون لوقت طويل لفهم كيفية جريان الأمور.

سـنبحث الآن مـثالاً آخـر: لعبة بليارد بعوائق مستديرة أو (محدبة). كمـا يفعـل الفيزيائيون دومـاً، سنجري تجريداً قليلاً للمنظومة: سنهمل الاحـتكاك و"الآثـار" (الـناتجة عـن دوران الكـرة)، وسـنفترض أن الاصـطدام هـو اصـطدامٌ مـن النوع المـرن. مـا يهمنا هـو حـركة مـركـز الكـرة، طالمـا لـيس هـناك اصـطدام، فـإن هـذه الحـركة هـي مستقيمة ومنـتظمة، أمـا عندمـا يحدث اصطدام مع عائق، فإن كل ما يحدث هو كمـا لـو أن مركـز الكـرة قـد انعكـس بعائقٍ أكـبر (أكبر من نصف قطر الكـرة انظر الشكل1) إن مسـار مركـز الكـرة ينعكـس تمامـاً بنفس الطريقة التي ينعكـس بها شعاع ضوئي على مرآة (وهكذا يتمثل هندسياً واقـعُ أنّ الاصطدامَ هو اصطدامٌ مرن). إن التشبيه بالمرآة يسمح لنا الآن بمواجهة تغيرات الشروط الابتدائية لمسألة البليارد.

لـنفترض أنـه يوجـد عـلى نفس طاولـة البلـيارد كـرة فعلـية وكـرة وهمية، وأنهمـا في نفس المكـان في البـدء. ندفـع الكـرتين معـاً باتجـاهين مخـتلفين قلـيلاً، لـكـن بـنفس السـرعة. يشـكل مسـار الكـرة الفعلية مـع الكـرة الوهمية زاويـة، لـندعوها الزاويـة **ألفا**، مـا نـلاحظـه أيضـاً أنّ المسـافة بيْن الكـرتين متناسبة مع الزمـن. يجب أن

نلاحظ أن هذا التزايد مع الزمن هو ليس **انفجار التزايدِ الأسيّ** croissance explosive exponentielle الذي بحثناه سابقاً. إذا كانت المسافة بين مركز الكرة الفعلية والوهمية بعد ثانية هي ميكرون (واحد بالألف من الميليمتر) فإنها بعد عشرين ثانية لن تكون أكثر من عشرين ميكروناً (الذي مازال صغيراً).



الشكل رقم 1. طاولة بليارد بعوائق محدبة. تنطلق الكرة من الزاوية السفلية اليسرى ويتبع مركزها (الخط المستمر)، وتنطلق كرةٌ وهمية في اتجاه مختلف قليلاً (الخط المتقطع). بعد عدة اصطدامات، يظهر المساران كأن لاعلاقة لأحدهما بالآخر.

إذا تأملنا قليلاً، نرى أن انعكاساً على حرف مستقيم لطاولة البليارد **لا** يعطينا أيَّ شيء جديد: تشكل المسارات المنعكسة نفس الزاوية **ألفا** كالسابق، وتبقى المسافة بين الكرة الفعلية والوهمية

متناسبة مع الزمن. لنتذكر أنّ الانعكاس عن حرف طاولة البليارد يخضع لنفس قوانين انعكاس الضوء عن مرآة: طالما أن المرآة مستوية فليس هناك من شيْء خارج المألوف.

ولكنا قد قلنا بوجود عوائق كروية على طاولة البليارد وهذا يشابه وضع مرايا محدبة في طريق حزمة ضوئية، وكما تعرفون فإن الصور المعكوسة عن مرايا محدبة هي مختلفةٌ عن تلك التي نلاحظها مع مرآة مستوية. هذا الموضوع محللٌ في كتب الضوء. سنجد أن ما يحدث أساساً هو الأمر التالي: إذا أرسلنا حزمةً ضوئية بزاوية **ألفا** على مرآة محدبة فان الحزمة المنعكسة لها زاوية مختلفة - لندعوها **ألفا فتحة** - أكبر من ألفا. لتبسيط الأمور نفترض أن الزاوية **ألفا فتحة** تساوي ضعف **ألفا** (إن هذا تبسيط مبالغ به كما سنرى لاحقاً). لنعد إلى طاولة البليارد مع العوائق الكروية والكرتان الفعلية والوهمية، في البداية يشكل مسار الكرتين زاويةً **ألفا** لا تتغير بالانعكاس على الحافة المستوية الطاولة. ولكن بعد الاصطدام بعائق كروي تنفرج المسارات وتشكل زاوية ألفا فتحة مساوية لضعف الزاوية ألفا، بعد اصطدام جديد تصبح الزاوية بين المسارين مساوية لـ 4 ألفا، وبعد 10 اصطدامات فإن الزاوية بين المسارين تصبح مساوية لـ 1024 ضعف من الزاوية البدائية إلفا، وهكذا. إذا كان لدينا اصطدام واحد في الدقيقة فإن زاوية المسارين ستزداد أسياً مع الزمن. في الحقيقة من السهل رياضياً إظهار[1] أن المسافة بين الكرتين هي أيضاً ستزداد أسياً

مع الزمن (طالما أنها لم تصبح كبيرة جداً): لدينا **اعتماد حساس على الشروط الابتدائية.**

حسب ما ذكرناه، فإن المسافة بين مركزي الكرة الفعلية والوهمية يجب أن تتضاعف كل ثانية. وهكذا فبعد 10 ثواني تزداد مسافة أولية مساوية لميكرون فتصبح 1024 ميكروناً، أي تقريباً مليمتراً واحداً، وبعد 20 (أو 30) ثانية تصبح المسافة أكثر من متر (أو كيلومتر)، وهذا بالطبع غير معقول حسب مقاييس طاولة البليارد، أين الخطأ إذاً؟ يكمن الخطأ في أننا بسَّطنا تحليلنا كثيراً: لقد افترضنا أنه بعد الانعكاس عن عائقٍ كروي، فإن زاوية مساري الكرتين تُضرب بـ 2 (تقريباً) ولكنها تبقى صغيرة. في الواقع، بعد مرور بعض الوقت تصبح الزاوية كبيرة وتتفرج المسارات وبينما تصدم إحدى الكرات عائق ما فإن الأخرى تمر تماماً بقربها.

لنلخص ما تعلمناه عن حركة كرة على طاولة بليارد مع عوائق كروية. إذا راقبنا معاً حركة كرة فعلية وكرة وهمية ضمن شروطٍ ابتدائية مختلفة قليلاً نرى أن مساراهما في **العادة** ينفصلان أسياً مع الزمن حتى تصدم كرة عائقاً ما بينما تمر الأخرى بقربها، وحينذاك لن يعود هنالك أية علاقة بين حركتي الكرتين. ولنكون أمينين من الواجب القول إنه يوجد شروط ابتدائية استثنائية للكرة الوهمية بحيث لا تفترق عن الكرة الفعلية: مثلاً يمكن للكرة الوهمية أن تتبع نفس مسار الكرة الفعلية ولكن بميليمتر خلفها. ولكن في الحالة العامة ينفرج المساران كما ذكرنا.

إن مناقشة البليارد كما قدمتها هي مناقشة مساعدة على الكشف heurisitique ، هذا يعني أنني جعلت الأشياء معقولة ولكن دون أن أعطي برهاناً حقيقياً. بتتبع نفس الأفكار يمكن أيضاً ، وهذا ضروري، القيام بتحليل رياضي دقيق للبليارد بعوائق محدبة. إن إجراء هذا التحليل هو مهمة صعبة، وقد قام بها الروسي ياكوف ج. سينائي[2] Yakov G. Sinai متبوعاً برياضيين آخرين. إن المناقشة الرياضية للمنظومات التي تعتمد بشكل حساس على الشروط الابتدائية ليست سهلةً على العموم، وهذا يشرح لماذا كان اهتمامُ الفيزيائيين بهذه المنظومات حديثاً نسبياً.

الفصل الثامن

هادامار، دوهم، بوانكاريه

Hadamard, Duhem, Poincaré

أمل أن أكون قد أقنعتك في الفصل السابق بأن مسار كرة على طاولة البليارد بعوائق محدبة يشكل ظاهرةً غريبة نوعاً ما. لنفترض أنني عدّلت الشروط الابتدائية، بتبديل الموضع والسرعة الفعلية للكرة بموضعٍ وسرعةٍ وهميين مختلفين قليلاً، عند ذاك يأخذ المسار الفعلي والمسار الوهمي -اللذان كانا في البداية متقاربين- بالتباعد بسرعة أكثر فأكثر، حتى لا يعود لأحدهما علاقة بالآخر، وهذا ما دعوناه الاعتماد الحساس على الشروط الابتدائية. من الناحية المفاهيمية، هذا اكتشاف مهم جداً. من الصحيح أن حركة كرة البليارد محددةٌ دون لبس بالشروط الابتدائية، إلا أننا محدودون أساساً في توقعنا لمستقبل المسار. إن لدينا في نفس الوقت حتمية ولاتنبوئية على المدى الطويل. في الحقيقة إن معرفتنا بالشرط الابتدائي هي دوماً ممزوجة مع بعض عدم الدقة: لا يمكننا تمييز الشرط الابتدائي الفعلي من بين العديد من الشروط الابتدائية الوهمية القريبة منه، وبالتالي لا نعلم أي التوقعات الممكنة هي الصحيحة. ولكن إذا كنا لا نستطيع أن نعرف مسبقاً

حركة كرة البليارد، فماذا سيكون عليه الأمر بالنسبة لحركة الكواكب؟ وبالنسبة للتنبؤ بحالة الطقس؟ ومستقبل الإمبراطوريات؟ تلك أسئلةٌ هامة، والأجوبة عليها -كما سنرى- مختلفة. من الممكن توقع حركة الكواكب لقرون، ولكن التوقعات الجوية المفيدة فهي محدودة بأسبوع أو أسبوعين. أما فيما يتعلق بمصير الإمبراطوريات، وبتاريخ الإنسانية فإنه من الطموح التكلم عنها، ومع ذلك فإن بعض النتائج ممكنة، وهذه النتائج هي لصالح اللاتنبؤية. يمكن فهم حماس الباحثين عندما رأوا أن تحليل كل هذه المسائل أصبح الآن في متناولهم.

ولكن يجب أن نكون حذرين، وقد ترغب في استيضاح بعض النقاط في ما يتعلق بموضوع كرة البليارد قبل أن تسمح لي بالتّفكر في تنبوئيّة préditibilité مستقبل الجنس البشري.

لقد أهملنا مثلاً في دراسة حركة كرة البليارد الاحتكاك frottement، لكن هل لنا الحق في إجراء هذا التقريب؟ يكثر طرح هذا النوع من المسائل في الفيزياء: هل التمثيلات المستعملة مسموح بها؟ يعتمد الجواب على السؤال الدقيق الذي نطرحه. إن وجود الاحتكاك هنا يعني أنّ الكرة حتماً ستنتهي إلى التوقف. ولكن إذا توقفت طويلاً بعد أن تكون الحركة قد أصبحت غير قابلة للتنبؤ، يمكننا افتراض - وهو افتراض مفيد - أنه لم يكن هناك احتكاك (في الحقيقة، إن لنظرية البليارد التي عرضناها بوجود عوائق محدبةٍ ميزة

كونها سهلة التحليل، ولكن تطبيقها على بليارد حقيقي يُظهِر مصاعب جمة).

يجب أن نواجه الآن مسألةً أكثر جدية: ما هي شمولية ظاهرة الاعتماد الحساس على الشروط الابتدائية؟ لقد حللنا منظومة خاصة هي منظومة البليارد بالعوائق المحدبة، وتوصلنا إلى نتيجة أن قليلاً من الارتياب الابتدائي يقود إلى اللاتنبؤية بمستقبل المنظومة على المدى الطويل، فهل هذا الوضع هو اعتيادي أم أنه استثنائي؟ ما ندعوه **منظومة** هو إما منظومة ميكانيكية بدون احتكاك أو منظومة مع منبع طاقي لتعويض الطاقة المبددة بالاحتكاك، أو منظومة أكثر عمومية بمكونات كهربائية وكيميائية، إلى آخره. المهم هو أنه لدينا تطورٌ زمني **حتمي** محددٌ تماماً، وحينذاك يقول الرياضيون إن لديهم **منظومة ديناميكية**. تشكل الكواكبُ التي تدور حول نجم محدد منظومةً ديناميكية (يمكن تمثيلها تجريدياً كمنظومة ميكانيكية دون احتكاك)، كما يشكل سائل لزج تدور فيه مروحة أيضاً منظومة ديناميكية (وهي منظومة مبددة في هذه الحالة لأنه يوجد احتكاك داخلي، يدعى تبدداً في السائل اللزج). إذا وجدنا تطوراً زمنياً حتمياً يمثل تاريخ الإنسانية بشكل مجرد وملائم، فإن هذا التطور سيكون هو أيضاً منظومة ديناميكية.

لنعد إلى سؤالنا: هل حالة الاعتماد الحساس على الشروط الابتدائية هي الشواذ أم هي القاعدة بالنسبة للمنظومات الديناميكية؟ هل يمكن التنبؤ بالتطور الزمني على المدى البعيد أم لا؟ في الحقيقة

توجد عدة إمكانيات، في بعض الحالات (مثلاً نواس مع احتكاك)، لا يوجد هناك اعتماد حساس على الشروط الابتدائية (يمكن التنبؤ بدقة كيف سيكبح الاحتكاك اهتزازَ النواس وكيف ستنتهي حالة النواس إلى حالة سكونية).

في حالاتٍ أخرى لدينا اعتماد حساس على الشروط الابتدائية بالنسبة لكل الشروط الابتدائية (وهذه حالة بين حالات أخرى، لكرة البليارد مع عوائق محدبة). وأخيراً، للكثير من المنظومات الديناميكية تصرفٌ مختلط، حيث يمكن التنبؤ بمستقبلها على المدى البعيد في بعض الشروط الابتدائية، ولا يمكن في حالة شروطٍ أخرى.

قد يخيب أملك لرؤية أن كل هذه الإمكانيات موجودة، ولكن تخيل أننا نستطيع أن نخبر متى تكون منظومة معينة في حالة اعتمادٍ حساس على الشروط الابتدائية، وما هي المدة التي يمكننا خلالها أن نثق بالتنبؤات حول التطور المستقبلي لهذه المنظومة؛ من الواضح أننا حينذاك نكون قد تعلمنا شيئاً مفيداً حول طبيعة هذه المنظومة. أريد الآن أن ألقي نظرةً تاريخية حول مسألة الاعتماد الحساس على الشروط الابتدائية، لقد اكتشف أجدادنا منذ زمن بعيد أنه من الصعب التنبؤ بالمستقبل، وأن أسباباً صغيرة يمكن أن يكون لها نتائج كبيرة. ما هو جديد نسبياً هو البرهان أن تغيراً بسيطاً في الشر ط الابتدائية لبعض المنظومات يقود عادةً إلى تغيرٍ لاحق في تطور المنظومة بحيث تصبح التنبؤات على المدى البعيد لافائدة منها إطلاقاً. لقد قام بهذا البرهان الرياضي الفرنسي جاك هادامار Jacques Hadamard في أواخر القرن

التاسع عشر[1] (لقد كان حينذاك في الثلاثينات من العمر، وعاش طويلاً ولم يتوفَ حتى 1963).

لقد كانت المنظومة المدروسة من قبل هادامار نوعاً من طاولة بليارد، حيث استبدل سطح الطاولة **بسطح ذو انحناء سالب**[2] courbure négative، ما نهتم به هو حركة نقطة متعلقة بهذا السطح تتحرك عليه بدون احتكاك. إن بليارد هادامار هو ما يدعى بالتعبير الفني: **السريان الجيوديزي**flot géodésique على سطح ذو انحناء سالب. من السهل تحليل هذا السريان الجيوديزي رياضياً، وهذا ما سمح لهادامار بأن يبرهن نظرية الاعتماد الحساس على الشروط الابتدائية (إن النظرية المتوافقة لطاولة بليارد مع عوائق محدبة هي أكثر صعوبة، ولم يبرهن عليها من قبل الفيزيائي سينائي إلا مؤخراً في السبعينيات).

لقد كان الفيزيائي بيير دوهم Pierre Duhem هو أحد الذين أدركوا الأهمية الفلسفية لنتيجة هادامار في ذلك الوقت، (لدى دوهم أفكاراً سابقة لعصره في الكثير من المجالات، ولكن معتقداته السياسية كانت رجعية بشكل واضح). ففي كتابٍ نُشِر في 1906 للعموم، عنون دوهم فقرة منه بـ: **مثال لاستنتاج رياضي لا يستعمل أبداً**[3]، وكما شرحه فإن هذا الاستنتاج الرياضي هو حساب مسار على بليارد هادامار، وهو يتصف بأنه "لا يمكن استعماله أبداً"، لأن ارتياباً صغيراً موجوداً بالضرورة في الشروط الابتدائية تنتج ارتياباً أكبر في المسار المحسوب إذا انتظر الإنسان زمناً كافياً، وهذا ما يجعل التنبؤ دون أية قيمة.

ألف فرنسي آخر كتباً في الفلسفة العلمية في ذلك الوقت: إنه الرياضي الشهير هنري بوانكاريه Henri Poincaré. يناقش بوانكاريه في كتابه **العلم والمنهج** Science et Méthode المنشور عام 1908[4] مسألة اللاتنبؤية ولكن بطريقة غير تقنية، لكنه لا يشير لا إلى هادامار ولا إلى التفاصيل الرياضية لنظرية النظم الديناميكية (النظرية التي اكتشفها، والتي يعرفها أكثر من أي إنسان آخر). وقد ذكر بوانكاريه ملاحظة أساسية وهي أن المصادفة والحتمية أصبحتا متوافقتين بخاصية اللاتنبؤية على المدى الطويل، ويشرح الموضوع بأسلوبه الواضح والموجز هكذا: "يحدد سببٌ صغيرٌ يتجاوزنا نتيجةً كبيرة لا يمكن أن لا نراها، وحينذاك نقول إن هذه النتيجة أتت مصادفةً".

يعلم بوانكاريه كم هي مفيدة الاحتمالات في دراسة العالم الفيزيائي، إنه يعلم أن المصادفة جزء من الحياة اليومية، وحيث أنه يؤمن بالحتمية الكلاسيكية (لم يكن هنالك الارتياب الكمومي في عصره)، فقد أراد أن يعرف ما هو مصدر المصادفة، ولقد وصل به تفكيره في هذه المسألة إلى عدة أجوبة. وبقولٍ آخر، لقد رأى عدة آليات يمكن بواسطتها للوصف الحتمي الكلاسيكي للعالم أن يُحيل بشكل طبيعي إلى تمثيل احتمالي، وأحد هذه الآليات هو الاعتماد الحساس على الشروط الابتدائية[5].

بحث بوانكاريه في مثالين لحالة الاعتماد الحساس على الشروط الابتدائية، المثال الأول هو لغاز مُكون من عدد من الذرات المتحركة

بسرعاتٍ كبيرة وفي كل الاتجاهات والمتعرضة للعديد من الاصطدامات المتبادلة. يقول بوانكاريه أن هذه الاصطدامات تُنتج اعتماداً حساساً على الشروط الابتدائية (الموقف يشابه مثال كرة بليارد التي تصدم عائقاً محدباً). تبرر اللاتنبؤية في حركة الجسيمات في الغاز وصفاً احتمالياً.

يتعلق المثال الثاني لبونكاريه بالأرصاد الجوية، وهنا أيضاً يوجد اعتماد حساس على الشروط الابتدائية، بالإضافة إلى ذلك فإن معرفتنا بالشروط الابتدائية هي دوماً قليلاً ما تكون دقيقة وهذا يفسر قلة الوثوقية بالتنبؤ بحالة الطقس. وهكذا وحيث أننا لا نستطيع التنبؤ بتتابع الظواهر الطقسية، فإننا نظن أن هذا التتابع يحدث بالمصادفة.

بالنسبة لاختصاصي معاصر فإن أكثر ما يدهشه في آراء بوانكاريه هو صفتها الحداثية. إن ديناميك غاز مكون من كرات مرنة من جهة، ومسار التغير العام في حالة الطقس من جهة أخرى كانت مواضيع دراسة أساسية خلال السنوات الأخيرة، ووجهة الرأي التي نعرضها هي تلك التي تصورها سابقاً بوانكاريه.

ما يدهش أيضاً هو الوقت الذي مضى بين بوانكاريه والدراسة الحديثة للفيزيائيين لظاهرة الاعتماد الحساس على الشروط الابتدائية. لم تستفد الدراسة الحديثة لما أصبح يدعى الآن **بالشواش** من الفهم الفيزيائي الثاقب الذي كان لدى هادامار، دوهم، وبوانكاريه. لقد لعبت رياضيات بوانكاريه (أو ما أصبحت عليه) دورها، ولكن أفكاره حول التنبؤات الجوية أُعيد اكتشافها بشكل مستقل.

وإنني أرى سببين لهذه الفترة الزمنية الغريبة التي تفصل بوانكاريه عن الدراسة الحديثة للشواش: الأول هو اكتشاف الميكانيك الكمومي الذي هز العالم الفيزيائي وشغل كل طاقات عدة أجيال من الفيزيائيين. يُدخِل الميكانيك الكمومي المصادفة بطريقة جديدة وأساسية، لماذا إذاً الإصرار على محاولة إدخال المصادفة عن طريق الاعتماد على الشروط الابتدائية في الميكانيك الكلاسيكي؟

إنني أرى سبباً آخر لنسيان أفكار هادامار، دوهم، وبوانكاريه، فقد أتت هذه الأفكار باكراً ولمّا توجد بعد الوسائل اللازمة لاستخدامها. لم يكن تحت تصرف بوانكاريه هذه الأدوات الفيزيائية الأساسية المتمثلة بـ نظرية القياس أو **النظرية الإرغودية érgodique** لذا لم يكن باستطاعته التعبير عن آرائه الحدسية الألمعية بلغة دقيقة. عندما يقرأ عالمٌ مؤلفات بوانكاريه الفلسفية اليوم، فإنه يترجم الأفكار التي يكتشفها لديه في إطار منظومة من التصورات المألوفة بالنسبة له، ولكن هذه التصورات لم تكن تحت تصرف بوانكاريه نفسه. لنلاحظ أيضاً أننا حين لا نستطيع معالجة مسألة بطريقة رياضية فإننا نستطيع دراستها عددياً بواسطة الحاسب، إلا أن هذه الطريقة التي لعبت دوراً أساسياً في دراسة الشواش لم تكن بعد موجودة في بداية القرن العشرين.

الفصل التاسع

الاضطراب : الحالات Modes

في يوم ماطر من عام 1957 مشى موكب جنائزي خلف نعش الأستاذ تيوفيل دو دندر Th. De Donder حتى مقبرة بلجيكية، وكان النعش مصحوباً بفرقة من خيالة الشرطة. للمتوفى الحق في هذا الشرف، ولقد رغبت أرملته أن يُعطَى هذا الشرف، وتبع الدفن بعضٌ من الزملاء الحزانى..

لقد كان تيوفيل دو دندر الأب الروحي للفيزياء الرياضية في الجامعة الحرة في بروكسل، وهكذا فهو أحد أجدادي الروحيين. لقد قام في عصره بعمل ممتاز في أبحاث الديناميك الحراري وفي النسبية العامة (ولقد دعاه إنشتاين "الدكتور الصغير الجاذب"[1]). ولكن عندما عرفته كان عجوزاً صغيراً غير قادر على القيام بأي عمل علمي، فقد غادَرَتْه مقدرته العلمية إلى الأبد، ولكن ليس الرغبة ولا الاندهاش اللذان هما في أساس وقلب البحث العلمي. عندما يصدف زميلاً ماراً في أحد دهاليز الجامعة، فإنه يُخضِع المسكين لتفسيرات طويلة حول "النظرية الرياضية لشكل الكبد" أو أبحاثه عن "دس[2] في الموسيقا"،

لأن الموسيقا والأشكال هي مواضيع متكررة للاندهاش العلمي[2]، وهاك أشياء أخرى: الزمن ولاعكوسيته، المصادفة، الحياة. هناك ظاهرة حركة السوائل التي تعكسُ وتجمع كل منابع الإدهاش هذه، تأمَّل في الهواء الذي يجري في أنابيب الأورغ، أو في ماء النهر حيث تتحرك الدوارات دوماً، وتغير من تحولاتها وكأنها تتحرك بإرادتها الحرة الخاصة. تَفكّرْ في حزمة الحمم المشتعلة والمنطلقة من بركان، تفكر في الينابيع في الشلالات... هناك عدة طرق لتشريف الجمال. بينما يخططُ فنان للوحة أو لينظمَ قصيدة، أو ليؤلف لحناً، يتخيل العالم نظرية علمية. لقد قال لي الرياضي جان ليري Jean Leray أنه طالما تأمل طويلاً الدوَّارات التي تتشكل عند ما يمر ماء نهر السين حول أعمدة الجسر الخامس في باريس، وكان هذا التأمل أحد منابع وحيه عند كتابة مقالته عام 1934 عن ديناميك السوائل[3]. لقد أَدهشت حركةُ السوائل الكثيرَ من العلماء، وخاصة الجريان المعَّقد وغير المنتظم، والذي يظهر عشوائياً حتى أننا نَصِفه بالاضطراب، فما هو الاضطراب؟ يتجادل الاختصاصين حول هذا السؤال الذي ليس له جواب واضح، عموماً فإننا مع ذلك نتعَّرف على جريان مضطرب حين نراه.

إن ملاحظةُ الاضطراب مشتركةٌ وسهلةٌ ولكن فهمه صعب. اهتم هنري بوانكاريه بديناميك السوائل، وكتب فصلاً عن الدوَّارات[4]، لكنه لم يجازفْ بتقديم نظرية في الاضطراب. أما

هايزنبرغ Werner Heisenberg أبو الميكانيك الكمومي فقد اقترح نظريةً في الاضطراب لم يكن لها صدىً كبير، لقد قيل إن الاضطراب هو مقبرة النظريات. بالتأكيد لقد استفادت النظرية الفيزيائية والرياضية لجريان السوائل من مساهمات ملحوظة، أتت من أوسبورن رينولدز Osborne Reynolds، جيوفري ي. تايلر Geoffery I. Taylor، تيودور فون كارمان Theodore von Karman، جان ليري Jean Leray، أندريه ن. كولموغوروفAndrei N. Kolmogorov، روبرت كريشنان Robert Kraichnan وآخرين، ولكن يظهر أن الموضوع لم يكشف لنا بعد أسراره الأخيرة.

سأقص في هذا الفصل والذي يليه حادثة من المعركة العلمية المؤججة لفهم الاضطراب، تُدخِل هذه الحادثة -التي ساهمتُ فيها- ما ندعوه الآن بالشواش. هذا يسمح لي بإعطاء تفاصيل أكثر من تلك التي للأحداث العلمية التي حدثت في مطلع القرن، حيث يظهر لنا اليوم المشاركون فيها كعمالقة كبار أنصاف أسطوريين، كما سأحاول إعطاء فكرة عن أجواء البحث العلمي، بدلاً من تقديم عرض تاريخي مختصر ومتوازن. للقارئ الذي يهتم بتاريخ الشواش، فإنني أنصحه بالعودة إلى المقالات الأصلية التي أعيد نشر عدد منها في مجلدين مفيدين جداً[5]، مما جعل الإطلاع عليها سهلاً.

لا يمكن برمجة اكتشاف الأفكار الجديدة، وهذا يشرح لماذا للثورات والمصائب الاجتماعية الأخرى أحياناً كثيرة تأثيرٌ إيجابي على

العلم. إن الانقطاع المؤقت لروتين نير العمل البيروقراطي، قاطعاً التيار عن منظمي العمل البحثي وهذه الفوضى تعطي فرصة للإنسان أن يفكر. مهما يكن فإن "أحداث" أيار 1968 كانت مفيدة لي، محدثةً انقطاع البريد والاتصالات، ومنتجةً جواً ثقافياً قليل الإثارة نوعاً ما، ولقد حاولت في ذلك الوقت دراسة الهيدروديناميك، وقرأت أثناءها كتاب ***ميكانيك السوائل*** للاندو وليفشتز Landau et Lifshitz، ولقد تحققت بهمة من الحسابات المعقدة التي يظهر أن المؤلفان يعشقانها، عندما وقعت فجأةً على شيء مهم: فقرةٌ عن ظهور الاضطراب، وبدون حسابات معقدة.

لفهم نظرية لاندو Landau حول ظهور الاضطراب، يجب التذكير أن حركة سائل لزج، مثل الماء ، تتباطأ بالاحتكاك وتتناهى إلى حالة السكون إلاّ إذا قدمنا طاقة بشكل مستمر. وبحسب القدرة المقدمة لإبقاء السائل في حالة الحركة، يمكننا رؤية أشياء مختلفة. لأخذ مثال محسوس، لنتأمل في صنبور مفتوح، إن القدرة المطبقة على السائل (وهي في التحليل الأخير الجاذبية) يتم التحكم بها بحسب فتح الصنبور قليلاً أو كثيراً. إذا فتحت الصنبور قليلاً فإنه يمكنك أن تتوصل إلى أن يكون الجريان بين الصنبور والمغسلة مستقراً: يظهر عمود الماء ساكناً (مع أن الماء بالطبع يجري فعلاً)، بفتح الصنبور بتأن أكثر قليلاً يمكنك (أحياناً) رؤية دفقات منتظمة من عمود السائل: نقول حينذاك أن الحركة هي حركة دورية بدلاً من مستقرة، وإذا

فتحت الصنبور أكثر فإن الدفقات ستصبح غير منتظمة، ثم إذا فتحت الصنبور حتى نهايته فإنك سترى جرياناً شديداً عديم الانتظام، إنه **الاضطراب**. إن تتابع الحالات التي ذكرتُ نموذجي لأي سائل يُقدم له منبعُ طاقة قدرةً متزايدة أكثر فأكثر، ويفسر لانداو هذا بأنك حين تزيد القدرة المطبقة، فإنك تحرض عدداً متزايداً من **حالات** modes السائل.

علينا هنا أن نقوم بالتعمق في بحر التصورات الفيزيائية ونحاول فهم ما هي **الحالة**؛ الكثير من الأشياء حولنا تبدأ بالاهتزاز أو النوسان عندما نلمسها: نواس، قضيب من المعدن، وتر في آلة موسيقية، كلها تتحرك بسهولة بحركة دورية، وأية حركة دورية كتلك هي **حالة أو طور**. يمكننا الحديث أيضاً عن حالات اهتزاز عمود من الهواء في أنبوب أورغ، أو عن حالات اهتزاز جسر معلق، وهكذا. لكل شيء فيزيائي معين عادة حالات كثيرة مختلفة، هي ما نريد تحديده والتحكم به، لنتأمل مثلاً ناقوس كنيسة: إذا كان شكل الناقوس قد اختير بشكل سيئ، فإن حالات اهتزازه المختلفة تتناسب مع اهتزازات متنافرة، ولا يكون الصوت رخيماً. مثال مهم للاهتزاز هو اهتزاز ذرات جسم صلب ما حول مواقع توازنها؛ الحالات الموافقة نسميها **فونونات**. ولكن لنعد إلى لانداو وإلى نظريته حول ظهور الاضطراب، فبحسب هذه النظرية، عندما يتحرك سائل ما بواسطة تأثير خارجي، تتحرض عدة حالات من حالات السائل، أما إذا لم

تتحرض أية حالة فإن السائل يكون في وضع مستقر. إذا تم تحريض حالة واحدة، نلاحظ الاهتزازات الدورية، أما إذا تحرضت عدة حالات، فإن حركة السائل تصبح غير منتظمة، وإذا تحرضت الكثير من الحالات، عندها يصبح السائل مضطرباً. لا يمكنني هنا سرد جميع الحجج الرياضية التي قدمها لانداو لتأييد آرائه، (باستقلال عن لانداو قدم الرياضي الألماني ايبرهارد هوبف، وبجهاز رياضي أكثر رهافة، نظرية مشابهة[6]. إذا قاربنا المسألة من وجهة نظر الفيزياء التجريبية، يمكننا القيام بتحليل لترددات الاهتزازات لسائل مضطرب، أي البحث عن الترددات الموجودة: نجد أنها عديدة جداً، وتشكل في الحقيقة طيفاً مستمراً يجب أن يقابل الكثير من الحالات المحرضة للسائل.

تظهر نظرية لانداو - هوبف كما قدمتها وكأنها تعطي وصفاً ملائماً لظهور الاضطراب؛ أي الطريقة التي يصبح بها سائل ما مضطرباً عندما نزيد القدرة المطبقة عليه من الخارج. ومع ذلك فإنني حين قرأت تفسير لانداو وجدته مشكوكاً به وقليلَ الإقناع فوراً، وسأشرح فيما يلي الأسباب الرياضية لشكوكي.

ولكن قبل ذلك من الواجب أن أتكلم قليلاً عن الحالات، في كثير من االأحوال يمكن أن نهز منظومة فيزيائية تبعاً لعدة حالات مختلفة في الوقت نفسه، وهذه الاهتزازات لا تأثير لأحدها على الأخرى. أعترف أن هذه المقولة ليست دقيقة. لتثبيت الأفكار، يمكننا أن

نتصور الحالات كمهتزات محتواة بشكل ما في منظومتنا الفيزيائية، وتهتز بشكلٍ مستقل. هذه الصورة العقلية مفيدة وتتمتع بأفضلية كبيرة لدى الفيزيائيين.

حسب المصطلحات الفنية لتوماس كون[7] Thomas Kuhn يمكن القول إن التأويل الفيزيائي للحقول الكبرى في الفيزياء باستعمال مصطلح الحالات - مفهومة كهزازات مستقلة - هو أنموذج paradigm. إن أنموذج الحالات بسيط وعام وقد ظهر أنه منتج بصورة مدهشة، ويمكن تطبيقه في كل مرة يمكن فيها تحديد حالات مستقلة أو شبه مستقلة. وهكذا فإن حالات اهتزاز الذرات في جسم صلب "**الفنونات**" ليست مستقلة تماماً: هناك تفاعلات فونون - فونون، ولكنها ضعيفة نسبياً، ويعرف الفيزيائيون (على الأقل بحدود ما) كيف يتعاملون معها.

لقد ساءني وصف لانداو للاضطراب بمصطلحات الحالات فور أن اطلعت عليه، لأنه كان يتعارض تماماً مع الأفكار الرياضية التي سمعتها تُعرضُ من قبل رينيه توم René Thom، والتي درستها في مقالة أساسية لـ ستيف سمال Steve Smale عن **المنظومات الديناميكية القابلة للاشتقاق**[8]. إن الفرنسي رينيه توم والأميركي ستيف سمال هما عالما رياضيات كبيران، الأول هو زميلي في معهد الدراسات العلمية للعلوم في بور - سور - إفيت، وقد قام الثاني بعدة زيارات لهذا المعهد. وتعرفت منهما إلى التطورات الحديثة لأفكار بوانكاريه حول المنظومات

الديناميكية، واعتباراً من ذلك بدا واضحاً أن نموذج الحالات بعيدٌ عن أن يكون عام التطبيق، فمثلاً لا يمكن لتطور زمني موصّف **بحالات** أن يكون معتمداً بشكل حساس على الشروط الابتدائية، وسأبين ذلك في الفصل القادم، وسأظهر أن **الحالات لا** تولّد إلاّ تطورات زمنية غير مهمة مقارنةً مع تلك التي حللها ستيف سمال كلما فكرت في المسألة كلما قل اقتناعي بنظرية لانداو: إذا كان هناك عدد من **الحالات** في سائل لزج فإنها يجب أن تتفاعل بين بعضها بقوة وليس بضعف، وعندها يتوقف التوصيف باستخدام مصطلح الحالات عن أن يكون صحيحاً، سيُستبدَلُ بشيء آخر مختلف، أكثر غنىً، وأكثر استدعاءً للاهتمام.

والآن، ماذا يفعل فيزيائي عندما يظن أنه اكتشف شيئاً جديداً؟ إنه يسطر "ورقة"، مقالة مكتوبة بلهجة مرمَّزة، ويرسل تلك المقالة للنشر في مجلة علمية، ويعهد ناشر المجلة إلى زميل (أو لعدة زملاء) مسؤولية الحكم على المقالة، أو أن يكون كما يقال **الحَكَم**. إذا قبلت المقالة فإنها تطبع بسرعة أكثر أو أقل من قِبَل المجلة العلمية المذكورة، هذا النوع من المجلات على كل حال لا يباع في أكشاك الجرائد. إنها تصل بالبريد الى المخابر، وتملأ الرفوف في مكاتب أساتذة الجامعات، ترصف الكيلومترات من رفوف المكتبات العلمية الكبيرة.

وهكذا قررت كتابة مقالة بالإنكليزية عن الاضطراب: "حول طبيعة الاضطراب"[1]، ولقد كتبت هذه المقالة بالتعاون مع فلريس

تيكنز Floris Takens، وهو رياضي هولندي قدم معارفه الرياضية، ولم يخفْ من أن يوسخ يديه وأن يعرِّض سمعته كرياضي للخطر بمعالجة مسألة فيزيائية. تشرح المقالة لماذا نعتقد أن آراء لانداو حول الاضطراب باطلة، ونقترح شيئاً آخر يُدخل مفهوم **الجواذب الغريبة** (attractuers étranges). لقد أتت هذه الجواذب الغريبة من مقالة ستيف سمال، ولكن الاسم كان جديداً، ولا أحد يتذكر الآن من الذي اخترعه (اسم الجواذب الغريبة) هل هو فلوريس تيكنز، أم أنا، أم شخص آخر، ولقد قدمنا مقالتنا إلى مجلة علمية مناسبة، وأُعيدت إلينا بسرعة: مرفوضة. لم يحب الناشر أفكارنا وأحالنا إلى مقالاته، لكي يمكننا أن نتعلم ما هو حقيقةً الاضطراب.

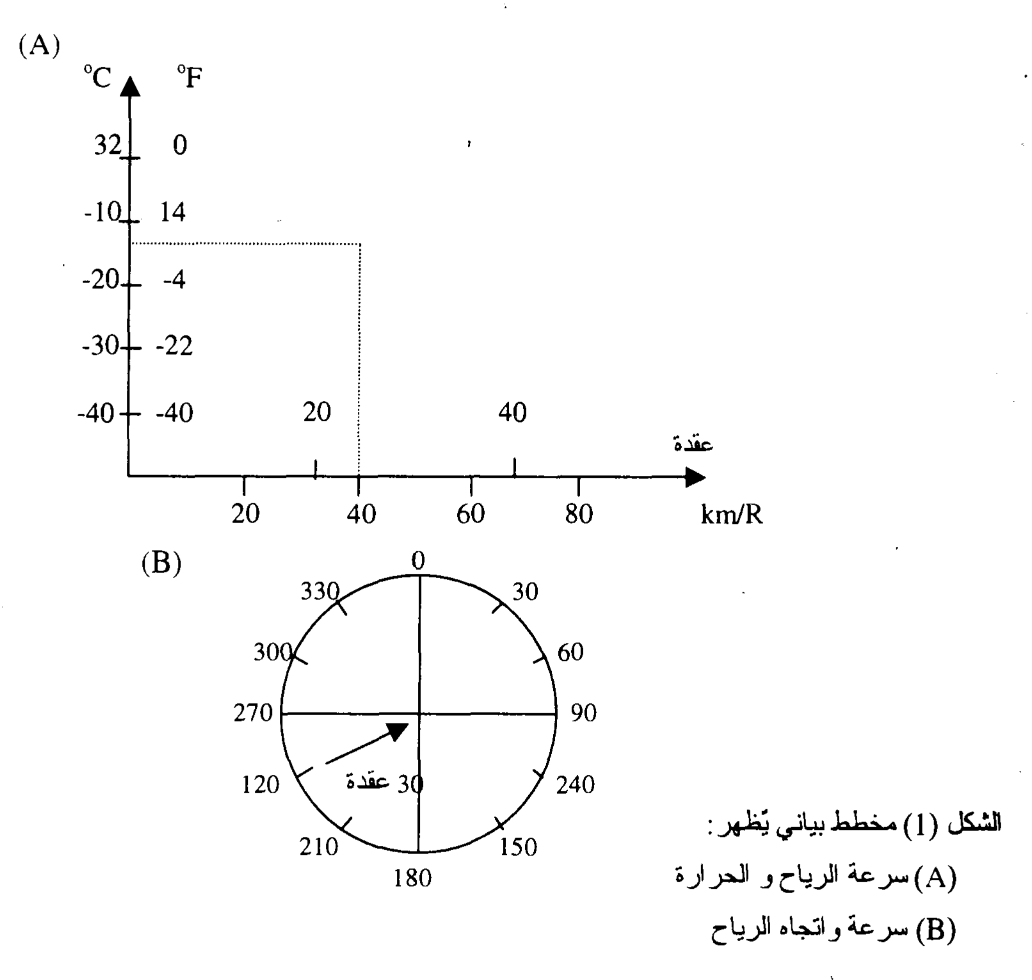
سأدع الآن مقالة "حول طبيعة الاضطراب" لمصيرها غير المؤكد، وسأهتم بموضوع آخاذ: الجواذب الغريبة.

الفصل العاشر

الاضطراب : الجواذب الغريبة

ليست الرياضيات مجموعة علاقات ونظريات فقط، بل إنها تحوي أفكاراً أيضاً، وإحدى هذه الأفكار التي تتميز بعموميتها وفائدتها هي فكرة: **التمثيل الهندسي géométrisation**، التي هي في الأساس تمثيل هذا الصنف من المواضيع الرياضية أو ذاك بنقاط في فراغ.

يوجد الكثير من التطبيقات العملية لفكرة التمثيل الهندسي على شكل رسوم تخطيطية وبيانية، فمثلاً إذا كنت مهتماً بمسألة التبريد بالهواء، من المهم لك أن تستعمل مخططاً بيانياً للعلاقة (حرارة-سرعة) للهواء مثل ذلك الذي في الشكل (A,1).



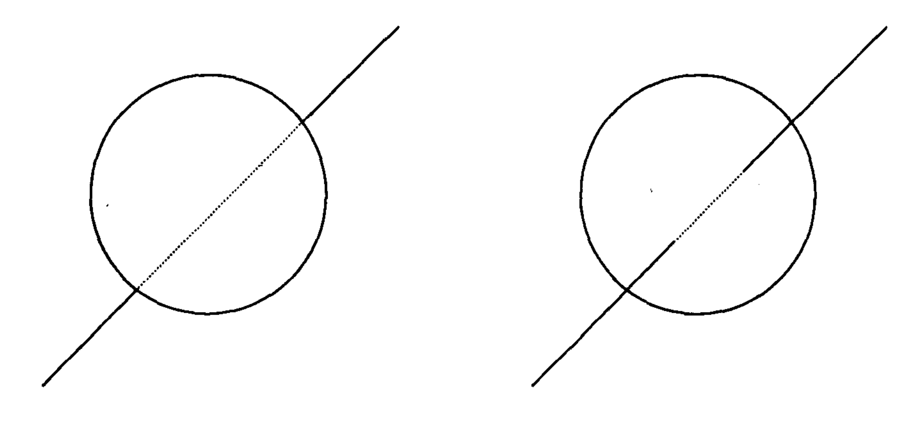
الشكل (1) مخطط بياني يُظهر:

(A) سرعة الرياح و الحرارة

(B) سرعة واتجاه الرياح

ميزة هذا التمثيل أنها لا تجبرك على اختيار نظام معين للوحدات systéme d'unité. إن المخطط البياني في الشكل (B,1) هو أحد المخططات المستخدمة من قبل الطيارين، فهو يشير إلى اتجاه الريح وكذلك إلى سرعتها، إذا أردت تمثيل اتجاه الريح وسرعتها ودرجة حرارة الهواء معاً يلزمك ثلاثة أبعاد؛ من السهل تصور مخططٍ بياني ذي ثلاثة أبعاد، لكن لا يمكن تمثيل إلا المساقط ذات البعدين على ورقة.

إذا أردت الآن تمثيل الضغط الجوي والرطوبة النسبية أيضاً، يلزمك فراغ من خمسة أبعاد، ويمكنك تقدير أن التمثيل الهندسي لم يعد قابلاً للتوظيف. ألم يُقَل أنه لا يمكن إلا لمساجين مشفى الأمراض العقلية "الرؤية في فراغ ذو أربعة أبعاد"؟ مع ذلك، الحقيقة مختلفة. فالكثير من الرياضيين والعلماء الآخرين معتادون أن يتصوروا أشياء في فراغ من 4، 5،.... بعد وحتى في فراغ بأبعاد لانهائية. يمكن الوصول إلى ذلك بتصور عدد من المساقط ببعدين أو ثلاثة، بالإضافة إلى استحضار بعض النظريات التي تخبرنا كيف يجب أن تبدوا الأشياء. مثلاً الشكل (A,2)هو في 10 أبعاد ويظهر مستقيماً يخترق كرة من تسعة أبعاد في نقطتين (تتشكل هذه الكرة ذات الأبعاد التسعة أو **الكرة الفائقة*** hypersphère من نقاط تبعد عن نقطة معينة (أ) بعداً متساوياً)؛ القسم المنقط هو جزء المستقيم الموجود داخل الكرة.



الشكل (2)

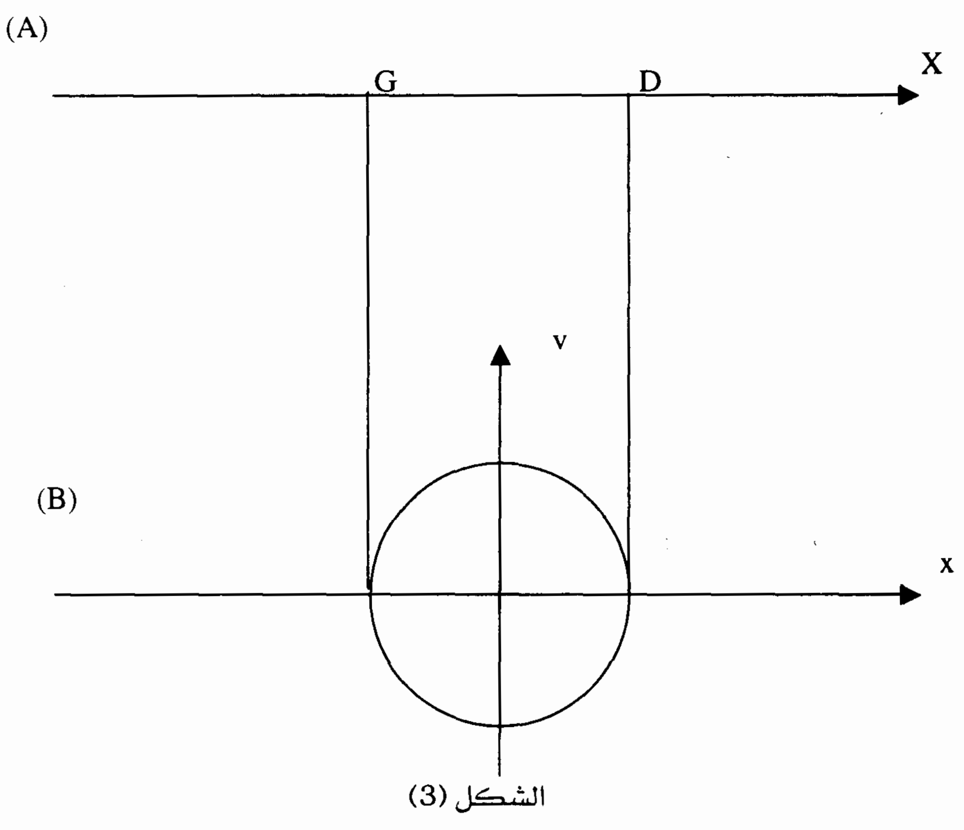
---

* **الكرة الفائقة: هي كرة في فراغ بأبعاد لا تقل عن الأربعة، اي مجموعة نقاط الفراغ التي تبعد عن نقطة معينة في هذا الفراغ بعداً متساوياً.**

(A) تقاطع مستقيم مع كرة ذات 10 أبعاد. (B) الشيء نفسه ببعدين

في الحقيقة، يُظهر الشكل (A،2) تقاطع مستقيم مع الكرة الفائقة hypersphère في أي فراغ ذو أبعاد أكبر أو تساوي 3 (مثلاً في فراغ لانهائي الأبعاد)، ويشرح الشكل (B,2) الموقف في حالة بعدين.

لنعد الآن إلى اهتزازات، أو **أطوار** الفصل السابق، ولنحاول تمثيلها هندسياً. يمثل الشكل (A,3) حالة نواس أو قضيب مهتز، أو أي شيء يتأرجح.

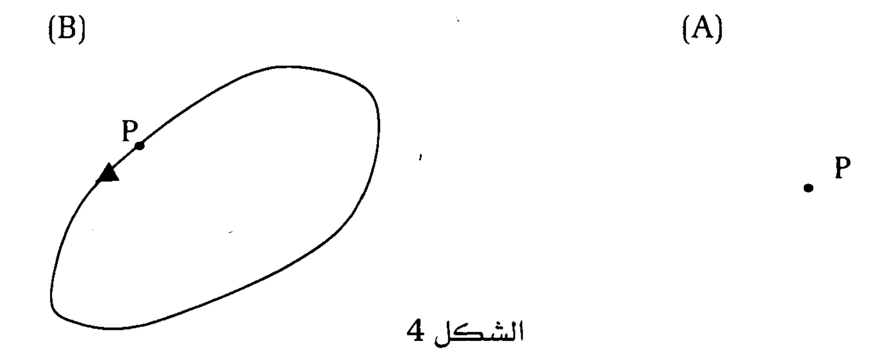


الشكل (3)

(A) الموقع x لنقطة مهتزة (B) الموقع x والسرعة v للنقطة نفسها.

يتأرجح الموقع من النقطة (G) في اليسار إلى النقطة(D) في اليمين، ثم من (D) في اليمين إلى (G) في اليسار وهكذا. قد لا يقدم لنا الشكل معلوماتٍ كثيرة، إلا أننا نسينا أن حالة منظومتنا المهتزة لاتُحدد بشكل جيد بموقعها فقط، بل يلزمنا أن نعرف أيضاً سرعتها. يُظهِر الشكل (B,3) المسارَ الذي يرسمه المهتز في المستوي (موقع-سرعة). هذا المسار هو حلقة مغلقة (دائرة إذا شئت)، والنقطة التي تمثل حالة المهتز تقوم بالطواف في الحلقة بشكل دوري.

سنهتم الآن بمنظومة سائل (مثل صنبور ماء في حال جريان كما وصفنا سابقاً).سنهتم **بالتصرف النظامي comportement du régime**، وسندع جانباً **الظواهر العارضة phénomène transitoire** التي تحدث مثلاً في اللحظة التي نفتح عندها الصنبور. يلزمنا لتمثيل منظومتنا فراغٌ لانهائي الأبعاد، حيث أنه من الضروري أن نحدد سرعة السائل في كل نقطة من نقاط الحيز (اللامنتهية) الذي يشغله، إلا أن هذا ليس مزعجاً. يُظهر الشكل (A,4) حالة مستقرة للسائل: لا تتحرك النقطة P التي تمثل المنظومة بل تبقى مستقرة. يتطابق الشكل (B,4) مع اهتزازات دورية للسائل: مسار النقطة الممثلة P هو حلقة مقفلة تقطعها P بشكلٍ دوري.

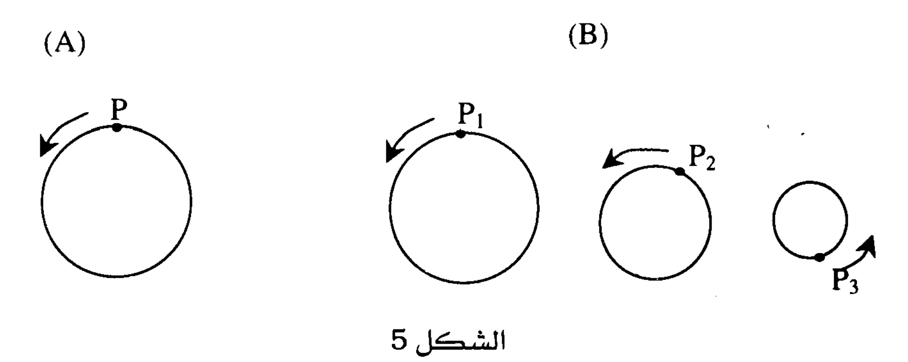


الشكل 4

(A) نقطة ثابتة P تمثل حالة مستقرة.

(B) حلقة دورية تمثل اهتزازاً دوريا للسائل. الأشكال هي إسقاط على بعدين لمسارات في فراغ لانهائي الأبعاد.

يمكن "تجليس" (redresser) الشكل (B,4) بحيث تصبح الحلقة دائرة، وبحيث تقطعها P بسرعة ثابتة، (يمكن الحصول على"التجليس" بواسطة ما يدعوه الرياضيون تغيير الإحداثيات اللاخطي: وكأننا ننظر إلى الرسم من خلال بلور مشوِه). إن اهتزازنا الدوري (أو الطور mode) ممثلٌ الآن بالشكل (A,5).



الشكل 5

(A) اهتزاز دوري (طور) ممثلاً بنقطة P تقطع الدائرة بسرعة ثابتة.

(B) تراكب عدة أطوار ممثلة بعدة مساقط مختلفة.

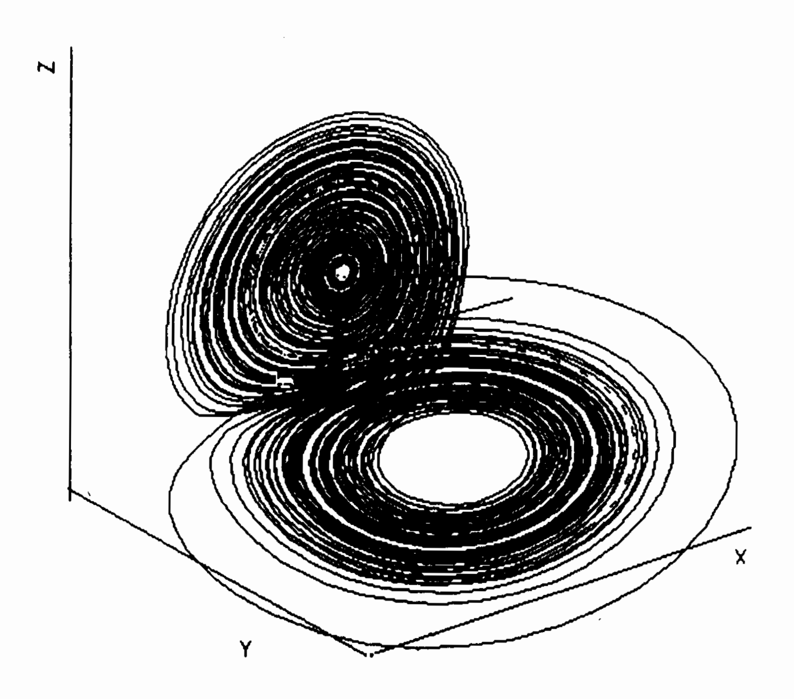
لدينا الآن تحت تصرفنا كل الأفكار الضرورية لتصور تراكب superposition عدة أطوار مختلفة. كما يُظهر الشكل (B,5)، فإن النقطة الممثلة P تظهر في مختلف الإسقاطات أنها تدور في دوائر بسرعات زاوية مختلفة، مناظرة لأدوار مختلفة (يجب اختيار الإسقاطات بطريقة مناسبة، وهذا يتطلب تغييراً لاخطياً للإحداثيات). يمكن للقارئ المهتم أن يتحقق من أن التطور الزمني الذي نناقشه (تراكب عدة أطوار) لا يعتمد بشكل حساس على الشروط الابتدائية[1]).

والآن لنتمعن في الشكل 6! إنه مشهد منظوري(en perspective) لتطور زمني (أو حركة) في ثلاثة أبعاد، تجري الحركة على مجموعة معقدة تدعى **جاذب غريب**، وهو في هذه الحالة **جاذب لورنز**[2] Attracteur de Lorenz.

اهتم عالم الأرصاد الجوية من معهد ماساشوستس للتكنولوجيا MIT إدوارد لورنز Edward Lorenz بمسألة الحمل الجوي convection atmosphérique، وهذا وصف لما هي عليه: تسخن الشمس الأرض، فتصبح الطبقات السفلى من الجو أسخن وأقل كثافة من الطبقات العليا، وهذا يستتبع حركة تصاعدية من الهواء الساخن والخفيف. وهكذا ينزل الهواء البارد والثقيل، وتدعى هذه الحركة بـ **الحمل**. وكما في ماء الصنبور الذي ناقشناه سابقاً، فإن الهواء هو سائل وحالته يجب أن تمثل بنقطة في فراغ لانهائي الأبعاد. وبدلاً من دراسة التطور الزمني الصحيح في أبعاد لانهائية فإن لورنز بسَّط الأمور، وتحول إلى

دراسة التطور الزمني في فراغ ذو ثلاثة أبعاد مستخدماً تقريباً للمسألة (تقريب فج). يمكن تحليل هذا التطور بالحاسوب، وما يخرج من الحاسب هو الشيء الممثل بالشكل 6 والذي ندعوه اليوم بجاذب لورنز. يجب تصور حالة الجو في وضعية الحمل ممثلة بنقطة P، والحركة الزمنية للنقطة P تحدث بحسب منحني يرسمه الحاسب. في حالة الشكل الذي لدينا، تنطلق النقطة P من قرب نقطة مبدأ الإحداثيات O، ثم تدور حول "الأذن" اليمنى للجاذب، ثم تدور عدة مرات حول الأذن اليسرى، ثم مرتين حول الأذن اليمنى وهكذا. إذا تغير الموقع الأولي للنقطة P قرب O بمقدار ضئيل (بحيث لا يلاحظ الفرق بالعين المجردة) فإن تفاصيل الشكل 6 ستتغير كلياً. سيبقى المنظر العام كما هو، ولكن عدد الدورات المتتالية يميناً ويساراً سيختلف كلياً، وهذا بسبب (كما أقر به لورنز) اعتماد التطور الزمني في الشكل 6 بشكل حساس على الشروط الابتدائية، وهكذا فإن عدد الدورات شمالاً ويميناً اعتباطي، وكما يظهر أيضاً عشوائي aléatoire، وفي جميع الحالات من الصعب التنبؤ به.

إن التطور الزمني المدروس من قبل لورنز ليس وصفاً واقعياً للحمل الجوي، ومع ذلك أعطت دراسته حججاً قوية لمصلحة عدم إمكانية التنبؤ بالحركة الجوية. كان الكل يأخذ بعين الاعتبار أن التنبؤات الجوية للمدى البعيد يجب أن تؤخذ بحذر. ما أظهره لورنز أن أخطاء زملائه في التنبؤ ترجع إلى سبب معقول وحقيقي : الاعتماد الحساس



$$x' = -10x+10y$$
$$y' = 18x-y-xz$$
$$z' = -8/3\ z+xy$$

الشكل (6). جاذب لورنز: الشكل هو ناتج عملية محاكاة حاسوبية أجريت بواسطة برنامج Matlab.

على الشروط الابتدائية. وكما رأينا فقد ذكر بوانكاريه نفس الملاحظة تماماً قبل ذلك بكثير (ولقد جهل ذلك لورنز)، ولكن قيمة عمل لورنز تكمن في صفته المحددة والدقيقة، مما سمح بتوسيعه ليشمل الدراسات الفعلية للتغيرات الجوية. قبل أن نغادر لورنز، أريد أن أذكر أن نتائجه كانت معروفة من علماء الأرصاد الجوية، ولكن لم تُدرَك قيمتها من قبل الفيزيائيين إلا مؤخراً.

أريد العودة إلى مقالة "حول طبيعة الاضطراب" التي كتبتها بالاشتراك مع فلوريس تيكنز والتي تركتها في نهاية الفصل السابق، وكانت قد نشرت أخيراً في مجلة علمية[3] (في الحقيقة كنت أحد محرري تلك المجلة، وقبلت بنفسي نشر تلك المقالة. من المفهوم أن هذه الطريقة ليست هي المفضلة عموماً، ولكني اعتقدت أن لدي العذر في هذه الحالة الخاصة). تحوي مقالة "حول طبيعة الاضطراب" بعض الأفكار التي فصّلها سابقاً بوانكاريه ولورنز (وكنا نجهل ذلك)، ولكننا لم نهتم بتغيرات الطقس وبالتنبؤ الجوي، ما كان يهمنا هو فقط المسألة العامة للاضطراب الهيدروديناميكي. **لقد أكدنا أن الجريانات الاضطرابية لا توصّف بتراكب عدة أطوار (كما اقترح ذلك لانداو وهوبف) ولكن بجواذب غريبة attracteurs étranges**.

ما الجاذب؟ إنه المجموعة التي تتحرك عليها النقطة P ممثلةً حالة منظومة ديناميكية معينة عندما ننتظر مدة كافية (يصف الجاذب حالة النظام régime**، بعد اختفاء الظواهر العارضة).** لكي يكون لهذا التعريف معنى من الضروري أن تكون القوى الخارجية المطبقة على المنظومة مستقلة عن الزمن (وإلا يصبح بالإمكان جعل النقطة P تتحرك بطريقة اعتباطية). من المهم أيضاً الاهتمام بمنظومات فيزيائية مُبددِة (أي منظومات تبدد القدرة على شكل حرارة، فمثلاً السوائل اللزجة تبدد القدرة الميكانيكية بالاحتكاك الداخلي)، والتبديد هو الذي يذهب بالعوارض الطارئة. وبسبب التبديد فإنه في

الفراغ لانهائي الأبعاد الممثل لمنظومة، هناك فقط مجموعة صغيرة (الجاذب) هي المهمة حقيقة.

النقطة الثابتة والحلقة الدورية في الشكل 4 هي جواذب ليس فيها أي شيء غريب. حالة النظام المتعلقة بعدد معين من الأطوار موصّفة بجاذب شبه دوري وليس غـريب بالإضافة إلى ذلك (رياضياً هـو حلقـة (tore)، عُد للملاحظة1)، ولكن جاذب لورنز هوجاذب غريب، كالكثير من الجواذب التي قدمها سمال (هذه الأخيرة هي أصعب في التمثيل البياني). تنتج غرابة الجاذب من المواصفات التالية غير المتكافئة رياضياً، ولكنها كثيراً ما تقدم نفسها معاً في الواقع العملي.

أولاً، للجواذب الغريبة شكلٌ غريب: فهي ليست بالمنحنيات أو السطوح الملساء ولكنها أشياء ذات **أبعاد غير صحيحة** (non entière) أو كما قال ماندلبروت هي كسوريات[4] fractal. وثانياً - وهذا أكثر أهمية- تُبدي الحركةُ على "جاذب غريب" ظاهرةَ **الاعتماد الحساس على الشروط الابتدائية**. أخيراً، مع أن الجواذب الغريبة ذات أبعاد منتهية، فإن تحليل الترددات الزمنية يُظهر أن هناك **استمرارية في الترددات**.

تستحق هذه النقطة الأخيرة الشرح: إن الجاذب المُمثِل لجريان سائل لزج هو مجموعة منتهية الأبعاد في فراغ حالات السائل لانهائي الأبعاد، وهكذا فإن الجاذب يُمثَل جيداً بمسقطه في فراغ منته الأبعاد، وحسب نموذج الأطوار، فإن فراغاً ذو أبعاد منتهية لا يمكن

أن يوصّف إلاّ عدداً منتهياً من الأطوار (رياضياً: لأنه لا يمكن لفراغ ذو أبعاد منتهية أن يحوي إلاّ حلقةً ذات أبعاد منتهية). ومع ذلك يُظهر التحليل الترددي طيفاً مستمراً من الترددات التي يجب أن تناظر عدداً لامنتهياً من الأطوار، فهل هذا أمر ممكن؟ هل لهذا علاقة ما بالاضطراب؟

الفصل الحادي عشر

الشواش : أنموذج جديد

يميل العلم العالمي المعاصر إلى التماهي مع العلم الأمريكي. بالطبع هناك الكثير من الأبحاث (والأبحاث الجيدة) خارج الولايات المتحدة، ولكن الولايات المتحدة تضبط موضة وأسلوب العمل. هذا النموذج من العمل يتصف بالمنافسة التي غالباً ما تكون عنيفة ودون وازع، وباهتمام بالإعلام كثيراً ما يتغلب على القيمة العلمية. هذا الأسلوب التنافسي، بالرغم من مظاهره المنفرِّة، خلق علماً كثير الحيوية، هو ما سأتكلم عنه قبل كل شيء. ومع ذلك لنفتح هلالين لنتكلم حول البحث العلمي الفرنسي، ففي مقابل البحث العلمي العالمي الأنكلوفوني، نجد أن موقف الباحثين الفرنسيين هو موقف غامض وغالباً وجل، فمن جانب هم منغمسون في منافسة على المستوى العالمي، ولكنهم من جانب آخر فإنهم مرتبطون بهيكلية نقابية لاتحفِّز الطموح. لا يزال الباحث يُقوَّم في غالب الأحيان بحسب ترتيب تخرجه من المدرسة منذ أكثر من عشرين سنة، وليس بحسب ما أنجزه بعد ذلك. بالإضافة إلى ذلك، وهذا مما لا يصدَّق، نجد أن

فرنسا غائبة عن النشر العلمي العالمي الذي ينشر بالإنكليزية بالطبع، في برلين، أو في سنغافورة أيضاً، بالإضافة إلى الولايات المتحدة وإنكلترا. بالرغم من ذلك فإن العلم الفرنسي لا يزال ذو مستوى رفيع، ونأمل أن لا يتعرض للخطر بسبب العناية الفظة جداً، والآن لنغلق الهلالين.

يكتب الباحثون العلميون المقالات، ويدعمونها بتقديم محاضراتٍ أُصطلحَ على تسميتها **بالندوات العلمية**، وذلك لنشر أفكارهم ونتائجهم. يحضر هذه الندوات دزينة من الزملاء أكثر أو (أقل)، ويرون معادلات ورسومات تتتالى خلال ساعة تقريباً؛ البعض يدونون ملاحظات، أو يتظاهر بذلك بينما يقوم فعلياً بالعمل على مسألته الخاصة. البعض الآخر يظهر وكأنه نائم، ولكنه يستيقظ فجأة ويطرح سؤالاً محدداً وله علاقة بالموضوع. الكثير من المحاضرات هي من الغموض المعتم الذي لا يمكن اختراقه، إما لأن المحاضر يضيع دون مخرج في حساباته المتعقّدة شيئاً فشيئاً، والتي تزداد عدم صحتها شيئاً فشيئاً، أو أنه ينتبه بعد نصف ساعة من المحاضرة إلى أنه نسي أن يذكر شيئاً أساسياً في البداية، أو أنه (أو أنها) يتكلم بإنكليزية بلقانية أو أسيوية بطريقة لا يفهمها إلا هو. رغم كل ذلك فإن الندوات هي في صلب الحياة العلمية، بعضها واضحة ومميزة، والأخر يُقدم بشكل متقن ولكنه تافه، والبعض الآخر يظهر غير مترابط وسيئ المظهر ولكنه هام جداً عندما نعي عن أي شيء يتحدث.

بعد كتابة المقالة عن طبيعة الاضطراب مع تاكنز، قدمت بعض المحاضرات حول هذا الموضوع وحول أعمالي السابقة في جامعات ومعاهد أمريكية، (قمت بزيارة معهد برنستون للدراسات العليا في السنة الدراسية 1970-1971)، ولقد أُستقبلت محاضراتي استقبالاً مختلفاً، ولكنه كان في المجموع بارداً. وأذكر مثلاً مزحات الفيزيائي يانغ في ما يتعلق بـ " أفكاري الخلافية حول الاضطراب"، بعد ندوة دعاني لإعطائها. يصف الوضع حالة العصر آنذاك، والجاذبية الضعيفة للأفكار التي كنت أدافع عنها.

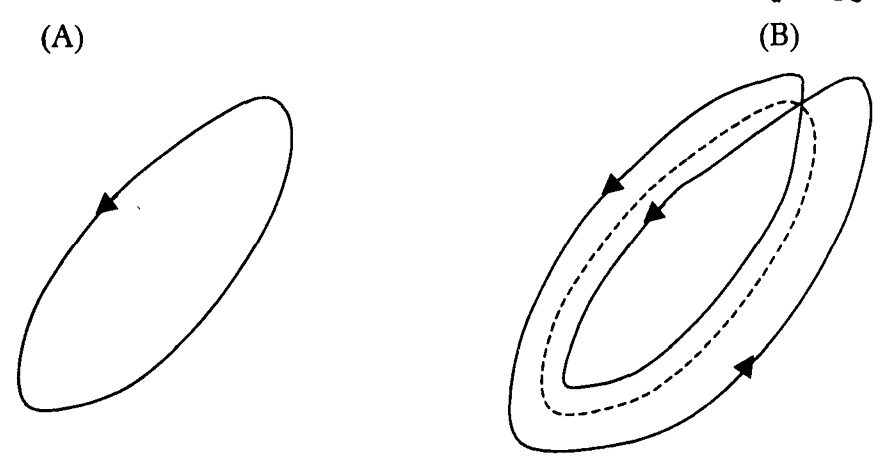
ما سبب قلق الفيزيائيين؟ عندما نُحرِّض سائلاً بتطبيق قوى خارجية متزايدة الشدة شيئاً فشيئاً، نتوقع بحسب النظرية المقبولة آنذاك، الظهور المتدرج لعدد أكبر فأكبر من الترددات المستقلة في السائل. أما نظرية الجواذب الغريبة فتتوقع العكس، تصرفاً مغايراً: ظهورَ طيف مستمر من الترددات.

من حسن الحظ أنه يمكننا في الفيزياء التحققُ من النظريات بالتجربة، وهكذا يمكن التحقق من التوقعات المختلفة التي تكلمنا عنها بتحليل التردد الزمني لكمية مقاسة من سائلٍ محرَّض لدرجة معتدلة. أول عمل في المسألة، بواسطة محاكاة حاسوبية قام به بول مارتن في هارفارد. وبعد ذلك جرت دراسة تجريبية على سائل حقيقي في مختبر جيري غولب وهاري سويني من كلية سيتي في نيويورك[1]، وكانت النتائج في الحالتين لصالح رويل-تاكنز لأكثر منها لصالح لانداو- هوبف حول ظهور الاضطراب.

في النهاية، تنهار الأمور، وحتى لو لم يُدرك ذلك حينذاك. تصبح الأفكار المتنازع حولها أفكاراً مهمة تدريجياً، ومن ثم أفكاراً معروفة جيداً. في البداية، عكف بعض الفيزيائيين والرياضيين على دراسة الجواذب الغريبة، وظاهرة الاعتماد الحساس على الشروط الابتدائية، ثم انتقلت العدوى إلى الكثيرين. أخيراً يتم الاعتراف بأهمية أفكار لورنز، ويظهر أنموذج جديد، يدشنه جيم يورك (وهو رياضي تطبيقي من جامعة ماريلاند) تحت اسم شواش[2]، ما يدعى اليوم شواش هو تطور زمني يعتمد بشكل حساس على الشروط الابتدائية. إذن الحركة على جاذب غريب هي حركة شواشية. يجري الحديث أيضاً عن ضجيج حتمي **(bruit déterministe)** عندما تُلاحظ اهتزازات شاذة ذات مظهر عشوائي، ولكنها ناتجة عن آليات حتمية. إذن يُنتج النظام الحتمي فوضى المصادفة.

إحدى نتائج نظرية الشواش التي تُظهِر جمالاً وفائدة خاصتين، هي شلال تضاعف الدور لفايغنباوم Feigenbaum. عندما نغير القوى المطبقة على منظومة فيزيائية ديناميكية، كثيراً ما نرى حدوث ظاهرة تضاعف الدور المبينة في الشكل 1. يحل مكان المدار الدوري مدارٌ آخر، قريب من الأول، ولكنه يقوم بدورتين قبل أن يعود إلى نقطة الانطلاق، ويكون الزمن اللازم للعودة إلى نقطة البداية، أي الدور قد تضاعف تقريباً. تُلاحظ ظاهرة تضاعف الدور في بعض تجارب الحمل: فالاهتزازات الدورية لسائل يُسخن من الأسفل، يمكن

أن تُستبدَل باهتزازات ذات دور أطول بضعفين عند تغيير درجة التسخين، كما أن نفس الشيء يمكن أن يحدث - أي تضاعف الدور - في حالة صنبور ينقط نقطة فنقطة، حين نزيد الفتحة، وهناك أمثلة أخرى عديدة.



الشكل 1. تضاعف الدور

(A) مدار دوري

(B) هذا المدار استبدل بآخر طوله ضعف الأول تقريباً.

المهم هو أن تضاعف الدور يمكن أن يحدث بطريقة متكررة معطياً أدواراً أطول بـ 4 مرات، ثم 8 مرات، ثم 16 مرة، ثم 32، 64، .... وهكذا، هذا الشلال من تتابع التضاعف موضح بالشكل 2. يقيس المحور الأفقي القوى المطبقّة على المنظومة الفيزيائية المعتبرة، والقيم التي يُلاحظ عندها تضاعف الدور ممثلة بالنقاط : 1A، 2A، 3A، ..... وهي تتجمع في النقطة A∞.

الدور T   الدور 2T   الدور 4T   القوة المطبقة

A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_∞

الشكل 2: شلال تضاعف الدور. عندما نغير القوة المطبقة على المنظومة يحدث تضاعف في الدور عند القيم التي تمثلها النقاط 1A، 2A، 3A، .... التي تتجمع في ∞A. لتسهيل إمكانية القراءة، استبدلت النسبة .... 4.66920 في هذا الشكل بقيمة أصغر.

إذا تفحصنا الآن في المجالات المتتابعة 2A1A، 3A2A، 4A3A، ......
نجد أن لها نسباً تقريباً ثابتة:

$$\frac{A_1A_2}{A_2A_3} \approx \frac{A_3A_4}{A_4A_5} \approx \frac{A_4A_5}{A_5A_6} \approx ......$$

وبعبارة أكثر دقة، لدينا العلاقة المدهشة التالية:

$$\lim_{n\to\infty} \frac{A_nA_{n+1}}{A_{n+1}A_{n+2}} = 4,66920..$$

عندما اكتشف ميتشل فايغنباوم هذه العلاقة عددياً كان لايزال فيزيائياً شاباً بوظيفة مؤقتة في مختبرات لوس ألاموس. كان يعمل ليل نهار على الحاسوب مدخناً دون توقف وشارباً القهوة الكثيفة، وقد حدد لنفسه هدفاً أن يبرهن على العلاقة، مستخدماً أفكار الفيزيائي كينيت ويلسون (آنذاك في كورنل) حول **زمر الاستنظام** (**Groupe de Renormalisation**). ويُلاحظ أن تضاعف الدور المتتابع هو أساساً دوماً نفس الظاهرة بتقريب تغيير مقياس الواحدات (أي عندما نقوم بتغيير

مناسب لوحدات القياس للمتحولات الداخلة في المسألة). ليس من السهل الحصول على تغيير مناسب لسلم المقاييس، ولا يعطي فايغنباوم في الحقيقة معالجة رياضية كاملة للمسألة. هذا ما يقوم به أوسكار لانفورد (آنذاك في بركلي) متتبعاً أفكار فايغنباوم، ولنذكر أن برهان لانفورد يستعين بالحاسب: في الحقيقة يتطلب هذا البرهان إجراء بعض الحسابات العددية الطويلة جداً، والتحقق من بعض المتراجحات التي من الصعب القيام بها يدوياً، ولذلك يقوم بها الحاسب بطريقة سريعة ودقيقة.

إذا راقبنا ظاهرة شلال تضاعف الدور في تجربة فيزيائية، فإنه لايمكن الخلط بينها وبين ظاهرة أخرى، بالإضافة إلى ذلك يمكننا إظهار أن هنالك شواش ما بعد الشلال (أي ما على يمين A∞ في الشكل 2).وهكذا فعندما نراقب شلال فايغنباوم في الهيدروديناميك، فإن هذا بحد ذاته برهان مقنع بشكل خاص على أن نموذج الأطوار لاينطبق هنا وعلى أنه يجب أن يستبدل بنموذج الشواش.

كنت سأنسى ذكر إحدى التفاصيل: إن مقالة فايغنباوم التي تصف نتائجه والتي أرسلها للنشر في مجلة علمية أعيدت له مرفوضة، ولحسن الحظ فإن محرراً آخر أكثر تنوُّراً قَبِلها في مجلة أخرى[3] لنعد الآن إلى تفسيرنا للاضطراب بالجواذب الغريبة، لم تتطلب مناقشتنا أي شيء خاص بالهيدروديناميك، فلقد استخدمنا فقط خاصية أن السائل اللزج هو منظومة ديناميكية مبدِّدة ولذا يمكن

توقع مشاهدة جواذب غريبة وشواش (أو ضجيج حتميّ) في كل أنواع المنظومات الديناميكية المبدِّدة، وهذا ما تُبرهن عليه اليوم تجارب لاتحصى.

ولكنني أحب أن أعود قليلاً إلى الوراء، إلى دوري الخاص في تاريخ الشواش. كنت أعلم أن لبعض التفاعلات الكيميائية تصرفٌ زمني اهتزازي، وأن مقالةً لكندل باي وبريتون تشانس وٌصفت تلك الاهتزازات في منظومات كيميائية ذات منشأ بيولوجي[4]. لذا ذهبت في بداية عام 1971 إلى فيلادلفيا لرؤية البروفسور تشانس ومجموعةً من مساعديه، وأخبرتهم أن يتوقعوا رؤية اهتزازات كيميائية لا دورية، أو "اضطرابية"، إضافةً إلى الاهتزازات الدورية. للأسف أعطى الخبير الرياضي للمجموعة رأياً سلبياً، ولم يعد تشانس مهتماً بفكرتي. بعد ذلك بوقت قليل، سنحت لي فرصة شرح أفكاري لـ باي الذي أظهر تفهماً أكثر، ولكنه ذكر لي أنه إذا ما قام بدراسة تفاعل كيميائي وحصل على تسجيل "مضطرب" بدلاً من دوري فإنه سيعتبر التجربة فاشلة، وسيرمي التسجيل في سلة المهملات. باستعادة الماضي، تشرح لنا هذه القصة ماذا كان الوقع العلمي لفكرة الشواش. عندما نحصل الآن على تسجيل اضطرابي أو شواشي يُعترَف به كما هو، ويُحلل بعناية.

لقد كتبت مقالة صغيرة تتضمن أفكاري حول التفاعلات الكيميائية، وتقدمت بها للنشر إلى مجلة علمية، لكنها رُفِضت، وقُبلت بعد ذلك من مجلة أخرى[5]. لوحظت مؤخراً تفاعلات كيميائية

شواشية، وأعطت المجال لأول عملية إعادة تركيب واضحة لجاذب غريب من قبل مجموعة من الكيميائيين في بوردو[6].

لقد قمت برواية بعض حوادث بدايات نظرية الشواش كما رأيتها وعشتها. بعد سنوات من ذلك أصبح الشواش موضة، وأصبح موضوعَ محاضرات عالمية. ثم رفع الشواش إلى مقام **العلم اللاخطي** وأنشئت مختلف معاهد البحث لدراسته تحت هذا الاسم الجديد. ظهرت مجلات علمية جديدة متخصصة تماماً بالعلم اللاخطي، وأخذ نجاح الشواش أبعادَ حدثٍ دعائي، ويمكن أن نتصور أن الباحثين الذين يعملون في هذا المجال أخذوا يرقصون ويغنون في الطرقات محتفلين بنصرهم. في الحقيقة، رقص البعض وغنى والبعض الآخر لم يفعل، وأريد أن أشرح لماذا.

يلزمني لأجل ذلك الحديث عن الوظيفة الكاسحة للموضات في العلم المعاصر، وهي وظيفة أكثر أهمية في الولايات المتحدة منها في فرنسا، أكثرُ أهمية في الفيزياء منها في الرياضيات، ولكن أينما كان ليست دون أهمية. تؤثر الموضات على المجتمعات وعلى تمويل العلم. يصبح موضوعٌ اختصاصي (مثل الشواش، أو نظرية الأوتار، أو الناقلية الفائقة في درجات الحرارة العالية) موضةً لبعض السنوات ومن ثم يُهمَل بعد ذلك، وبين ذلك يُقتحَمُ الموضوع بحشود من الناس الذين لا تجذبهم الأفكار العلمية، ولكن يجذبهم النجاح والمال. بالطبع يتحسس الجو الثقافي للموضوع من ذلك، وأحياناً بطريقة كارثية.

سأعطي مثالاً بسيطاً شخصياً لهذا التغير في المناخ العلمي. بعد نشر مقالتي حول الاهتزازات الكيميائية المذكورة سابقاً، قال لي زميل: "لقد نالت هذه المقالة شهرة كبيرة، لقد حاولت إيجادها في مكتبة الجامعة، فوجدت أنها اقتُطِعَت بشفرة حلاقة". نسيت الأمر إلى أن تلقيت بعد ذلك رسالة من مكتبة جامعية أخرى فيما يخص مقالة أخرى لي[7] شُوِّهَتْ باقتطاع أول صفحة منها. من الواضح أن المطلوب هذه المرة هو جعل المقالة غير قابلة للإفادة وليس الحصول على نسخة رخيصة.

مع ذلك، يبقى هذا النوع من التصرفات التي تكلمت عنه هو الشواذ، ولكنه صفة لوضعٍ جديد، فالمسألة لم تعد في إقناع زملاءك أن أفكارك التي هي موضوع خلاف تمثل الحقيقة الفيزيائية، بل أصبحت في خوض المنافسة بكل الوسائل، والوصول بهذا إلى الشهرة.. وإلى تمويلات البحث.

لنعد إلى النجاح الذي حصلت عليه نظرية الشواش. لقد كان هذا النجاح مفيداً للرياضيات، حيث استفادت نظرية المنظومات الديناميكية القابلة للاشتقاق من الأفكار الجديدة دون انحطاط مناخ البحث (الصعوبة التقنية للرياضيات تجعل الغش صعباً). للأسف أن النجاح في فيزياء الشواش ترافق مع انخفاض في إنتاج نتائج مهمة، وهذا بالرغم من الإعلانات المنتصرة لنتائج صاخبة. عندما تتراكم الأشياء، وعندما تدرك بتواضع صعوبة المسائل المطروحة، عند ذلك ربما تظهر موجة جديدة من النتائج العالية الجودة.

الفصل الثاني عشر

الشواش: نتائج

الكثير من الأعمال الحديثة في الشواش، هي كما ذكرت في الفصل السابق من لوعية متدنية، وهذا ما أزعج عدداً من العلميين وخاصة بين الرياضيين الذين ساهموا بصورة رئيسية في ولادة الموضوع، ماذا يبقى إذا تناسينا ما يقال بأنها اكتشافات دون أساس جدي؟ ومن كتلة الحسابات التي لا أهمية لها؟ نعم، يبقى مجموعة من الأفكار والنتائج المهمة بشكل جلي، وسأناقش فيما يلي بعض الأمثلة، في محاولةٍ لإظهار فائدة هذه الأفكار الجديدة.

لنتذكر أولاً أن الرياضيين عرفوا ظاهرة الاعتماد الحساس على الشروط الابتدائية منذ أعمال هادامار في نهاية القرن التاسع عشر (وهذه المعرفة لم تغِب أبداً). مع ذلك فقد قدمت لنا الحواسيب صوراً لجواذب غريبة غير متوقعة، تحفّز هذه الصور ذات التركيب الدقيق والكثير الجمال غالباً، خيالنا وتفرض مسائل رياضية جديدة وشاقة تأخذ بأنفاس الاختصاصين. أريد أن أتكلم في هذا الموضوع المثير بإسهاب، ولكن الأسئلة المتعلقة هي حقاً جدُ تقنية لسردها هنا،

وسأتحاشى أيضاً مناقشة الكثير من المسائل التقنية المهمة المتعلقة بالشواش في الفيزياء والكيمياء.

لنعد إذن إلى نقطة البداية: اضطراب السوائل. يحب الهيدرو ديناميكيون أن يكون لهم نظرية في **الاضطراب المطور** (Turbulence Developée)، إنهم يحلمون بحوضٍ كبير مليء بسائل مضطرب، ويحلمون أيضاً أن يُرى الشيء ذاته إذا لوحظ متر مكعب من السائل أو سنتيمتر منه. بدقةٍ أكثر، إذا غيرت مقياس الطول، فيجب أن ترى الشيء نفسه فيما إذا غيرت مقياس الزمن بطريقة مناسبة. نجد هنا كما في دراسة شلال فايغنباوم فكرة **لاتغير المقياس** (invariance d' echelle) التي تلعب دوراً كبيراً في الفيزياء الحديثة، فهل يحقق الاضطراب الحقيقي مبدأ لاتغير المقياس؟ لا نعرف ذلك، إن نظرية كولموغوروف التي تقارب بشكل جيد ظاهرة الاضطراب، هي غير متغيرة مع المقياس، ولكن لا يمكن لهذه النظرية أن تكون صحيحة تماماً لأنها تفترض أن الاضطراب متجانسٌ فراغياً، حيث إننا نلاحظ دوماً في سائل مضطرب مناطق صغيرة ذات فعالية شديدة تظهر على خلفية هادئة نسبياً (و هذا صحيح في كل المقاييس!). لذلك يتابع الهيدروديناميكيون البحث عن نظرية صحيحة تأخذ بالاعتبار اللاتجانسية الفراغية للاضطراب.

لقد وضّحت الجواذب الغريبة والشواش مسألة ظهور الاضطراب، ولكن لم توضح الاضطراب المطوّر. مع ذلك وحتى إذا لم يكن لدينا

نظرية صحيحة للاضطراب، فإننا نعرف الآن أن تلك النظرية يجب أن تستدعي ظاهرة الاعتماد الحساس على الشروط الابتدائية. وهكذا في تحليلٍ حديث لنظرية كولموغوروف فإننا لم نعد نحاول التعرف على أدوار **الأطوار**، ولكن على **الزمن الخاص** الفاصل بين تطورين زمنيين لمنظومة بدءاً من شروط ابتدائية متقاربة، وهذا تقدم مهم في التصور. إن علم الأرصاد الجوية، متتبعاً أفكار إدوار لورنز، استفاد من فكرة الاعتماد الحساس على الشروط الابتدائية، في الحقيقة وبحسب لورنز يمكن لخفق جناح فراشة أن يغير، بعد بعض الوقت، حالة الجو تماماً (وهذا ما يدعى الآن "أثر الفراشة").

وحيث أنه لدينا الآن صور مأخوذة من الأقمار تُرينا الغيوم، فإنه من السهل نسبياً (عارفين اتجاه الرياح) التنبؤ مسبقاً بالطقس ليوم أو يومين، وللذهاب أبعد من ذلك فإن علماء الأرصاد أدخلوا نماذج **للتغيرات العامة للجو**؛ الفكرة هي تغطية سطح الأرض بشبكة من النقاط وبالتعرف على بعض المتحولات الجوية في كل نقطة من الشبكة (الضغط الجوي، الحرارة، الخ)، ومن ثم محاكاة التطور الزمني لهذه المعطيات باستخدام الحاسوب، ويمكن الحصول على المعطيات الابتدائية (أي قيم المتغيرات الجوية في لحظة معينة نختارها كلحظة ابتدائية) بواسطة مراقبات أرضية وجوية (أي من الجو) وبواسطة الأقمار، يستعمل الحاسب هذه المعطيات والمواقع المعروفة للجبال، ومعلومات أخرى لحساب المتحولات الجوية في زمن لاحق،

ويمكن آنذاك مقارنة التنبؤات مع الواقع.... النتيجة أنه يلزم أسبوع لكي تصبح الأخطاء غير مقبولة، أيمكن أن يكون هذا بسبب الاعتماد الحساس على الشروط الابتدائية؟ أي نعم، إذا أعدنا الحساب بشروط ابتدائية مختلفة قليلاً سنجد أن التطورين الزمنيين المحسوبين يفترقان عن بعضهما بنفس السرعة التي يفترق فيها التطور الزمني الذي تقوم به الطبيعة، للأمانة من الواجب أن نقول أن التطور الطبيعي يفترق عن التطور المحسوب بسرعة أكبر من تلك التي يفترق فيها تطوران محسوبان عن بعضهما، إذن هناك إمكانيات لتحسينات (في برنامج الحاسوب، في كثافة الشبكة المستعملة، وفي الدقة التي تقدر بها المعطيات الأولية)، ولكننا نعرف مسبقاً أننا على كل حال لايمكننا التنبؤ بدقة بحالة الطقس التي ستكون عليه بعد أسبوع أو أسبوعين، لقد وجد علماء الأرصاد خلال تحليلهم بعض الأوضاع (دعيت **بالإغلاق blocage**) حيث التنبؤ بالجو أفضل من العادة، وهكذا فإنه لدينا بعض إمكانية التحكم بالتنبؤ الجوي، وهذا ما هو مدهش لدرجة كافية إن كان على الصعيد التصوري أو العملي.

قد تبدأ بالشعور بالقلق من أن شيطاناً صغيراً يمكن أن يستفيد من الاعتماد الحساس على الشروط الابتدائية إلخ، وبمنابلة غير ملحوظة أن يصل إلى تشويش مجرى حياتك الجيدة الترتيب، سأقدر الآن كم يتطلب ذلك من وقت، والتقديرات التي سأقدمها هي، حسب طبيعة الموضوع، نوعاً ما تقديرية وغير أكيدة، ولكن المناقشات التي حدثت بيني وبين بعض الزملاء تشير إلى أنها ليست ببعيدة عن الواقع.

إن القوى الجاذبة التي تجذبك إلى مركز الأرض، والتي تجذب الأرض إلى الشمس، تعمل أيضاً خلال ذرات الهواء الذي نتنفسه وكل الجزيئات الأخرى للمادة في الكون. إن شيطاننا الصغير حسب اقتراح الفيزيائي البريطاني ميكائيل بيري يوقف خلال برهة جذب القوة الجاذبية المطبقة على ذرات الهواء من قبل إلكترون منفرد وموجود في مكان ما على أطراف الكون المعروف. بالطبع أنت لا تشعر بشيء على الإطلاق، ولكن يحدث انحراف لا يذكر في مسارات ذرات الهواء، وهذا يشكل تغييراً في الشروط الابتدائية. نتعامل مع ذرات الهواء ككرات مرنة ونركز انتباهنا على إحداها، بعد كم من الاصطدامات تتحاشى هذه الذرة (ممثلة ككرة مرنة) الاصطدام بذرة أخرى صدمتها سابقاً إذا كان تأثير الجاذبية لإلكترون بعيد لم يوقف للحظة؟ لقد بين ميكائيل بيري بإتباعه حسابات رياضي فرنسي سابق هو أميل بوريل، أنه يكفي خمسون من هذه الاصطدامات[1] وهكذا بعد جزء بسيط من الثانية، أصبحت اصطدامات ذرات الهواء بتفاصيلها مختلفة جداً، ولكن الفرق ليس ظاهراً لك، ليس بعد.

يمكن أن نفترض أن الهواء موضوع البحث هو في حركة اضطرابية، ويكفي لذلك أن يكون هناك ريحٌ خفيفةٌ فقط. إذا كان هناك اضطراب، فإن هنالك اعتماد حساس على الشروط الابتدائية، وهذا يؤثر على التبدلات الميكروسكوبية كتلك التي أحدثها شيطاننا الصغير ويجعلها تزداد. والنتيجة أنه بعد حوالي الدقيقة يكون

التدخل اللحظي لجاذبية إلكترون على أطراف الكون قد أنتج تأثيراً ماكرسكوبياً: تفاصيل الاضطراب على مستوى الميليمتر لم تعد هي نفسها، ولكنك لاتزال لا تشعر بشيء، ليس بعد.

مع ذلك فإن تغيراً في بنية الاضطراب structure de la turbulence على مقياس صغير يُنتِج بعد مدة معينة تغيراً في البنية على مقياس كبير، وهناك آليات لذلك، ويمكننا تخمين الوقت اللازم باستعمال نظرية كولموغوروف (كما ذكرت، هذه النظرية ليست صحيحة تماماً، ولكنها مع ذلك تعطي فكرة عن حجم المقاييس orders de grandeur). لنفترض أننا في منطقة مضطربة جوياً (حدوث عاصفة، يمكن أن تكون فكرة جيدة). يمكن أن نتوقع أن منابلة شيطاننا الصغير يمكن أن تُنتج بعد عدة ساعات (أو يوم) تغييراً في الاضطراب الجوي على مستوى عدة كيلومترات، وسيكون هذا التغيير محسوساً تماماً: فالغيوم لها شكل مغاير ومعدل تقلب الريح ليس هو نفسه، ولكنك يمكن أن تقول أن هذا لا يغير شيئاً حقيقياً في مجرى حياتك المرتب جيداً، ليس بعد.

من وجهة نظر التغيرات العامة للجو، ما حصل عليه الشيطان الصغير ليس إلا تغييراً لا يذكر في الشروط الابتدائية، ولكننا نعرف أنه بعد أسبوع أو اثنين فإن التغيير سيؤثر على مجمل الطقس على الكوكب(2).

لنتصور الآن أنك نظّمت رحلة آخر الأسبوع مع صديقك أو صديقتك أو رئيسك أو رئيستك، لا يهم، وقد مددت سماطاً على العشب، وها قد بدأت عاصفة من البرد والمطر غير متوقعة وحقيقة قوية مُدَّبَرة من الشيطانة الصغيرة، لقد حصلت عليها العاصفة- بمنابلة دقيقة للشروط الابتدائية (نعم، لقد نسيت أن أقول أن هذا الشيطان الصغير هو آنسة)، هل اقتنعت الآن أن مجرى حياتك المرتب بدقة يمكن أن يتغير؟ الحقيقة أن فكرة الشيطان الصغير كانت بإحداث كارثة جوية وذلك بتحطيم طائرة كنتَ قد اتخذتَ لكَ مقعداً فيها، ولكنني أقنعته بعدم القيام بذلك لكي لا ينزعج الركاب الآخرون.

لنعد الآن إلى تطبيق الشواش على العلوم الطبيعية، الكل يعلم أن للأرض حقلاً مغناطيسياً يؤثر على إبرة البوصلة، يُغيِّر هذا الحقل من قطبيته من وقت لآخر؛ هناك فترات يكون القطب المغناطيسي الشمالي فيها قريباً من القطب الجنوبي الجغرافي، وبالعكس، تحدث انقلابات الحقل المغناطيسي الأرضي على فترات متفاوتة بمعدل مليون من السنين (نعلم الآن أن هذه الانقلابات قد حدثت لأنها تركت أثراً في مغناطيسية بعض الصخور الاندفاعية والتي يمكن تزمينها). يعترف الجيوفيزيائيون أن هناك حركات للمادة داخل الكرة الأرضية بواسطة حركة الحمل convection، تُولد هذه الحركات تياراتٍ كهربائية، والحقل المغناطيسي الملاحظ هو إذن ناتج عن آلية **دينامو** شبيهة بتلك التي لمولد كهربائي. يمكن أن يكون لهذا الدينامو

الغريب تطور زمني شواشي، وهذا يفسر التغيرات التي تحدث أحياناً في قطبية الحقل المغناطيسي الأرضي، للأسف ليس لدينا نظرية مفصلّة تؤكد تماماً هذا التفسير الشواشي.

يرجع إلى جاك ويزدم Jack Wisdom تطبيق جميل ومقنع للشواش يتعلق بـ "الثقوب" الموجودة في حزام الكويكبات التي تدور بين المشتري والمريخ. يتكون الحزام من عدد من الأجرام السماوية الصغيرة التي تدور حول الشمس، ولكن على بعد معين من الشمس لا يوجد كويكبات. لقد حَيَّرتْ هذه "الثقوب" التي في الحزام دارسي الميكانيك السماوي لزمن طويل، واُقترحت نظريات تتنبأ بمواقع الثقوب على أساس آلية **الطنين** لكنها ليست واضحة، وتتنبأ بوجود ثقوب أخرى لم تتم ملاحظتها. ويبدو أن التفسير التالي المبني على دراسة حاسوبية مفصلُة هو الصحيح: للكويكبات الموجودة في المناطق الطنينة مسارات متغيرة شواشياً، وبالنسبة لبعض المناطق الطنينة، يقود التغير في شكل المسار الكويكبَ إلى أن يقطع مدار كوكب المريخ، وهذا ما يؤدي إلى اصطدامهما وإلى اختفاء الكويكب. بهذه الطريقة تُفرَّغ بعض مناطق الطنين وتصبح ثقوباً بينما لا يحدث ذلك لأخرى. لتقرير فيما إذا كانت منطقة طنينية هي منطقة مُفرّغة أم لا، نضطر إلى اللجوء إلى دراسة الديناميك الشواشي، وهو صعب ويتطلب استخدام الحاسوب[3].

لننعطف الآن قليلاً وباختصار نحو البيولوجيا، حيث نرى في هذا المجال كل أنواع الاهتزازات: اهتزازات كيميائية كما في تجارب باي وتشانس المذكورة سابقاً، الإيقاع اليومي (التبدل اليومي ما بين فترة نشاط وفترة راحة)، خفقات القلب، الموجات الكهربية الدماغية الخ. لقد حرَّض الاهتمام الحالي بالمنظومات الديناميكية عدة دراسات، ولكن الدقة التي يمكن الحصول عليها في تجارب البيولوجيا هي أقل من تلك التي نحصل عليها في الفيزياء والكيمياء، وهكذا فإن تفسيرها أقل تأكيداً: فمثلاً إذا كان هنالك شواش، هل من الممكن أن يكون مفيداً؟ أم أنه ليس إلا مظهراً مرضياً؟ تم اقتراح الفكرتين السابقتين في حالة الإيقاع القلبي. من الواضح أنها فكرة جيدة أن ندرس المنظومات البيولوجية كمنظومات ديناميكية، وقد أوحت هذه الفكرة ببعض الأعمال الجيدة، إلا أنه لا يمكننا أن نستخلص من بعض الدراسات التي تنشر شيئاً مفيداً، ويبدو أنه يجب الانتظار أكثر حتى تبرز نتائج راسخة بصدد الشواش البيولوجي.

أريد أن أنهي هذا الفصل ببعض الملاحظات العامة التي تُظهر سبب هذه الصعوبة في تحليل الشواش في مجال علوم الحياة، في علوم البيئة، في الاقتصاد، وفي العلوم الاجتماعية. تقتضي الدراسة الكمية للشواش في منظومة معينة فهماً كمياً لديناميك هذه المنظومة، وهذا الفهم مُؤسَسٌ غالباً على معرفة جيدة بمعادلات التطور الزمني للمنظومة، والتي يمكن آنذاك التعامل معها بدقة باستخدام الحاسوب.

يغلب هذا الوضع في علم فلك المجموعة الشمسية وفي الهيدروديناميك، وحتى في الأرصاد الجوية، في حالات أخرى، من مثل التفاعلات الكيميائية المهتزة، حيث أننا في جميع هذه الحالات لا نعرف المعادلات الدقيقة للتطور الزمني للمنظومة، ولكن يمكننا الحصول تجريبياً على تسجيلات طويلة ودقيقة تدعى بالسلاسل الزمنية يمكن انطلاقاً منها إعادة تكوين الديناميك إذا كان بسيطاً لدرجة كافية (والذي هو كذلك في حالة التفاعلات الكيميائية المهتزة، ولكن ليس بالنسبة لحالة الأرصاد الجوية). ليس لدينـا في البيولوجيا والعلوم الطرية* معادلات جيدة للتطور الزمني (لا تكفي النماذج التي تعطي توافقاً كيفياً)، ومن الصعب أيضاً الحصول على سلاسل زمنية طويلة بدقة جيدة. وأخيراً فإن الديناميك ليس بسيطاً على العموم، ويجب أن نرى أيضاً أنه في أغلب الحالات (علوم البيئة، الاقتصاد، العلوم الاجتماعية) وحتى إذا توصلنا إلى كتابة معادلات التطور الزمني، فإن هذه المعادلات يجب أن تتغير ببطء مع الزمن لأن المنظومة "تتعلم" وتغير من طبيعتها، لذلك فإن تأثير الشواش في منظومات كهذه يبقى في مستوى فلسفة العلم أكثر منه في مستوى العلم الكمي[4]. مع ذلك فإن التقدم ممكن: لنتذكر أن أفكار بوانكاريه حول عدم قابلية التنبؤ في الأرصاد لم تكن أكثر من فلسفة علمية، بينما أصبح هذا المجال اليوم جزءاً من العلم الكمي.

---

* العلوم الطرية: مثل علم النفس وعلم الاجتماع والبيولوجيا حيث من الصعب تمثيل المنظومات المدروسة بنظم رياضية دقيقة، في مقابل علوم الرياضيات والفيزياء والكيمياء. (المترجم)

الفصل الثالث عشر

اقتصــاد

لقد اهتممنا في الفصول السابقة بالتطورات الزمنية الحتمية، ورأينا أنه إذا غيرنا قليلاً الحالة الأولية للمنظومة، فإن التطور الزمني الجديد يمكن أن يختلف بسرعة أسية عن التطور الأصلي، حتى لا يعود لأحدهما أية علاقة بالآخر: وهذه هي ظاهرة **الاعتماد الحساس على الشروط الابتدائية**. هذه الظاهرة لا تتطلب حالة ابتدائية خاصة (مثل توازن قلق)، ويمكن أن تحدث لمجموعة واسعة من الحالات الابتدائية، وعند ذاك يمكننا أن نتكلم عن **شواش**. إن التنبؤ بالتصرف المستقبلي لمنظومة شواشية هو بالتعريف، محدود جداً، رغم أن المنظومة حتمية. لقد أظهرت الدراسات في السنوات الأخيرة، وخاصة باستخدام المحاكاة الحاسوبية، أن الكثير من الظواهر الطبيعية تُبدي تطورات زمنية شواشية. لذا نحب أن نرى -على الأقل كيفياً- الوظيفة التي يلعبها الشواش في الاقتصاد، وفي علم الاجتماع، وفي تاريخ البشرية. إن المسائل التي تتعلق بهذه الاختصاصات تمسنا غالباً أكثر من دوران الكويكبات بين المريخ والمشتري، أو حتى التنبؤات

الجوية، ولكن تحليلها هو بالضرورة وصفي وغير دقيق بعض الشيء. ولنهيئ أنفسنا لهذا التحليل سنستعرض بعض الأسئلة الأساسية.

لنعد أولاً إلى منابلات الشيطان الصغير في الفصل الأخير. قد تحدثك نفسك بأنه من المستحيل إطلاقاً أن نوقف الجاذبية بين الجسيمات، حتى لأجزاء الثانية، وحتى لو كانت الجسيمات بعيدة عن بعضها البعض، ويمكنك أن تعتبر أيضاً أن العالم الذي نعيش فيه هو العالم الوحيد الممكن، وأن من الحرام أو مما لا يمكن تصوره أن نستطيع تغيير أي شيء فيه، وأن هذا ببساطة لا معنى له، ولكن يجب أن نعرف أن مناقشتنا لا تتعلق إلا بفكرة تصورية عن كوننا. في هذا الوصف التصوري يؤدي تغيير مبدئي صغير لدرجة لا معقولة، إلى تغييرات كبيرة بعد عدة أسابيع، وهذه هي على الأقل النتيجة الهامة التي تتعلق بتحكمنا الفكري بطريقة تطور الكون.

في أي المنظومات نجد تطورات زمنية شواشية؟ لنفترض أنه لديك نموذج لتطور زمني يتعلق بمنظومة طبيعية تهمك، كيف تعرف أن هذا النموذج يُبدي ظاهرة الاعتماد الحساس على الشروط الابتدائية؟ إذا كان يمكن للحاسوب أن يحاكي التطور الزمني للنموذج، فإنه يمكننا بهذه الطريقة معرفة فيما إذا كان لدينا شواش أم لا، ومع الأسف لا يوجد عدا ذلك إلا معايير غامضة. لوصف هذه المعايير سأعود للحظة إلى استخدام **الأطوار modes** التي ناقشناها كثيراً سابقاً. إذا كان لدينا عدة أطوار تهتز بشكل مستقل، فإننا نعرف أن التطور

الزمني المرافق ليس شواشياً. لندخل الآن، **مزاوجة (couplage) أو تفاعلاً (interaction)**، بين الأطوار المختلفة، هذا سيعني أن تطور كل طور أو مهتز محدد في كل لحظة ليس بحالة هذا المهتز فقط، ولكن أيضاً بحالة المهتزات الأخرى، لكن في أية حالة سيظهر الشواش؟ نعم يلزم **ثلاث مهتزات على الأقل** لكي ينتج تزاوجهم الشواش، بالإضافة إلى ذلك **كلما كان هناك عدد أكبر من المهتزات كلما كان هناك تزاوج أكثر بينها، وكلما ازداد توقع ظهور شواش.**

على الغالب، في حالة نمط المنظومات الديناميكية التي ندرسها (منظومات في زمن مستمر)، فإننا لا نحصل على تطور زمني شواشي إلا في فراغ ذي ثلاثة أبعاد على الأقل. وقد تم التحقق من هذه النظرية، وأحد الأمثلة هو الجاذب الشواشي للورنز الذي يوجد في فراغ ذي ثلاثة أبعاد. بالإضافة إلى ذلك، إذا أدخلنا التفاعلات بين منظومات مستقلة، فإننا نجعل وجود الشواش أكثر احتمالاً، وخصوصاً إذا كانت التفاعلات قوية (لا يجب أن تكون قوية كثيراً). هذا التأكيد يكتنفه الغموض حتماً، ولكنه مفيد من الناحية العملية.

تستحق النقطة التي سنبحثها الآن التأمل، فحتى لو أبدت منظومةٌ ما ظاهرةَ الاعتماد الحساس على الشروط الابتدائية، فإن هذا لا يعني أننا لا نستطيع أن نتنبأ شيئاً عن مستقبل هذه المنظومة. إذا كانت المنظومة معزولةً وعلى خلفية من الشواش، فإن ما يمكن التنبؤ به حول مستقبلها هو مسألة صعبة ومهمة، ولاتزال - للأسف - بعيدةً

عن الحل. لمقاربة هذه المسألة، لم يبق لنا إلا استخدام الحس العفوي. لنلاحظ خاصةً أن الكائنات الحية تملك قابلية مدهشة للتأقلم مع تغيرات البيئة المحيطة بواسطة آليات منُظّمة، وهكذا بإمكاننا القيام بتبؤات فيما يتعلق بها، أفضل من التنبؤات التي يوحي به الشواش المحيط، فيمكنني مثلاً أن أتنبأ أن حرارة جسدك هي 37 س، لاأعلى من ذلك بكثير ولا أقل من ذلك بكثير، وإلا فإنك لن تستطيع قراءة هذا الكتاب.

مرة ثانية سأذكر ملاحظة عامة أخيرة: تتعامل النظرية العامة للشواش المعتاد مع التطورات الزمنية المتكررة، أي أن المنظومة تعود دون كلل إلى حالات قريبة من الحالات التي مرت بها في السابق. لاتظهر هذه "العوْدة الأبدية" في الغالب إلا في المنظومات معتدلة التعقيد، وبالعكس فإن التطور التاريخي للمنظومات الشديدة التعقيد هو نمطياً وحيد الاتجاه: التاريخ لا يعيد نفسه. في هذه المنظومات الشديدة التعقيد وغير التكرارية، هناك عموماً اعتماد حساس على الشروط الابتدائية، ولكن المسألة تتمحور حول معرفة فيما إذا كانت محدودة بآليات منظمة، أو أنها تُحدِث نتائج مهمة على المدى الطويل.

لننعطف الآن بثقة (أو ربما بشجاعة) نحو مسائل الاقتصاد: هل يمكن عزل تطورات زمنية مهمة معتدلة التعقيد وربما شواشية؟ لإشعال مصباحنا، سنتفحص سيناريو تقدم اقتصادي بحسب أفكار المنظومات الديناميكية، ومن ثم نناقش هذا السيناريو بطريقة نقدية.

فكرة السيناريو هي أن نضع على التوازي من جهة اقتصاد مجتمع ما في عدة مستويات من التقدم التكنولوجي، ومن جهة أخرى منظومةً فيزيائية مبدِّدة خاضعة لعدة مستويات من القوى الخارجية؛ يمكن للمنظومة المبدِّدة أن تكون مثلاً طبقة من سائل لزج مسخن من الأسفل، ومستوى القوى المطبقة على المنظومة هو مستوى التسخين. بالطبع لا ننتظر أن نرى إلا تشابهاً كيفياً بين المنظومة الاقتصادية والمنظومة الفيزيائية.

يمكن أن نعتقد أنه في مستويات تقدم تكنولوجي مُتدنِّية يكون الاقتصاد في حالة استقرار تماثل الحالة المستقرة لطبقة من سائل خاضع لتسخين ضعيف، (الحالة المستقرة هي حالة مستقلة عن الزمن، وهكذا فهي مهمة جداً من وجهة نظر الديناميك)، أما في مستويات أعلى من التقدم التكنولوجي أو من التسخين، فيمكن أن نتوقع رؤية اهتزازات دورية، وبالفعل لقد لوحظت **دورات اقتصادية** شبه دورية. أما في مستويات أكثر علواً في التقدم التكنولوجي، فيمكن أن يكون لدينا تراكب superposition دورين أو ثلاثة أدوار مختلفة، وقد لاحظ المحللون الاقتصاديون مثل هذه النتائج. وأخيراً، في مستويات من التقدم العالية كفايةً، فإن من المفروض وجود اقتصاد مضطرب، مع تبدلات شاذة غير معتادة، واعتماد حساس على الشروط الابتدائية، وليس من غير المعقول التأكيد أننا نعيش في مثل هذا الاقتصاد في الوقت الحالي.

هذا مقنعٌ كفايةً، أليس كذلك؟ وصفياً نعم، ولكن إذا أردنا أن نقوم بتحليل كمي، فإننا سنصطدم فوراً بحقيقة أن الدورات

والتقلبات الاقتصادية الأخرى تحدث على خلفية عامة من النمو **croissance**. هناك تطور تاريخي باتجاه وحيد لا يمكن نسيانه، بالإضافة إلى ذلك فإن الدورات الاقتصادية لها طابعها التاريخي: كل منها مختلف، وببساطة لا نشاهد تكراراً رتيباً لنفس الظاهرة الديناميكية.إذا حاولنا إعطاء تفسير ديناميكي للظواهر الاقتصادية، فإنه تحضرنا أفكار جون كينز ومن أتوا بعده. ومع ذلك فإن معظم الاقتصاديين يقدّرون الآن أن أفكاره، مع أنها هامة، إلا أن قيمتها تنبؤية محدودة. وبقولٍ آخر لا يمكن تحليل الاقتصاد (أو بدقة أكبر الماكرو اقتصاد - الاقتصاد الكبري) بطريقة مقنعة كمنظومة ديناميكية معتدلة التعقيد، حتى وإن شابه منظومةً كهذه من بعض النواحي.

مع ذلك فإنني أعتقد أن سيناريونا ليس خاطئاً تماماً، وأن قيمته ليست رمزية فقط، لماذا؟ لأننا لم نستخدم صفات بارعة للمنظومات الديناميكية، ولكن بالعكس استخدمنا وقائعَ ذات أساس راسخ. إن واقعاً كهذا يعطي لمنظومة معقدة، (أي منظومة مكوَّنة من عدة منظومات جزئية متفاعلة مع بعضها بقوة)، حظاً أكبر من منظومة بسيطة في أن يكون تطورها تطور زمني معقد. وهذا يجب أن ينطبق خاصة على المنظومات الاقتصادية، والتقدم التكنولوجي هو طريقة للتعبير عن هذا التعقيد. واقعٌ آخرُ أساسي هو أن النموذج type الأبسط للتطور الزمني هو حالة استقرارية: لا يوجد اعتماد على الزمن، وتبقى

المنظومة دوماً مشابهة لنفسها. إذا نظرنا إلى المنظومات ذات "العْودة الأبدية"، فإن التطوْرات الزمنية غير المستقرة الأكثر بساطة هي الاهتزازات الدورية، بعد ذلك يأتي تراكب (superposition) اثنين أو عدة اهتزازات (أو أطوار) وأخيراً الشواش. إذا توصلنا إلى حذف خلفية النمو الاقتصادي العام يمكننا أن نأمل أن تنطبق هذه الملاحظات على المنظومات الاقتصادية. هذا السيناريو، حتى وإن كان قليل القيمة كمياً، فإنه يمكن أن يكون معقولاً من الناحية الكيفية، وسنتفحص الآن إحدى نتائجه.

الفكرة الأساسية في الحكمة الاقتصادية هي أن حرية التجارة وإزالة الحدود الاقتصادية هي لصالح المجموع. لنفترض أن البلد (أ) والبلد (ب) ينتجان كلاهما فراشي ومعاجين أسنان لاستهلاكهما الداخلي، ولنفترض أن جو البلد (أ) هو أفضل لنمو وإنتاج فراشي الأسنان، بينما لدى البلد (ب) مناجم غنية بمعجون أسنان ممتاز. إذا أقيم اقتصاد حر التبادل فإن البلد (أ) سينتج فراشي أسنانٍ قليلة الكلفة، والبلد (ب) سينتج معجون أسنان قليل الكلفة أيضاً وسيتم تبادل هذه المنتجات بين البلدين لصالح كل منهما. وعموماً يبين الاقتصاديون (تحت بعض الشروط) أن اقتصاد التبادل الحر يقود إلى التوازن المثالي لمنتجي مختلف البضائع الاقتصادية. ولكن في الحقيقة ما يُوصَى به هو تكوين منظومة اقتصادية معقدة يحصل عليها بمزاوجة اقتصاديات محلية مختلفة، وهذا يمكن كما رأينا أن يُنتِج

تطوراً زمنياً معقداً وشواشياً، بدلاً من توازن مناسب، (تقنياً، يسمح الاقتصاديون لأن يكون "التوازن" حالة معتمدة على الزمن، ولكن لا أن يكون له مستقبل لا يمكن التنبؤ به). إذا عدنا إلى البلدين (أ) و(ب) نرى أنهما بمزاوجة اقتصادهما وبربطهما مع اقتصاد (ج) و(د) الخ يمكن أن يتكون موقف قلق يمكن أن يؤدي إلى اهتزازات اقتصادية غير متحكم بها، وهذا يؤدي إلى الإضرار بصناعتي فراشي الأسنان ومعجون الأسنان، وبنتيجته حدوث نخر في الأسنان لا يحصى. وهكذا يساهم الشواش من بين أمور أخرى بآلام الرأس لدى الاقتصاديين.

سأتحدث بعموميةٍ أكثر. تبحث المعاهدات الاقتصادية بالتفصيل أوضاع التوازن بين العوامل الاقتصادية القادرة على التنبؤ بدقة بالمستقبل، ويمكن أن تعطي هذه المعاهدات الانطباع أن وظيفة المشرّعين والرسميين هي إيجاد وتحقيق توازن يكون خاصة لصالح المجتمع، ولكن أمثلة الشواش في الفيزياء تعلّمنا مع ذلك أن بعض الأوضاع الديناميكية، بدلاً من أن تؤدي إلى توازن، تؤدي إلى تطور زمني شواشي لا يمكن توقعه. لذلك على المشرّعين والرسميين المسؤولين أن يواجهوا احتمال أن تؤدي قراراتهم -التي يُتَوقع أن تنتج توازناً أفضل - في الواقع إلى نتائج قد تكون كارثية. إن تَعقُّد الاقتصاديات المعاصرة يشجع تصرفات شواشية كهذه، ويبقى فهمنا النظري في هذا المجال محدوداً.

في اعتقادي لا يوجد شك أن الاقتصاد والمال يقدمان أمثلة على الشواش واللاتنبؤية impreditibilité (بالمعنى التقني)، ولكن من الصعب الذهاب أبعد من ذلك، لأنه ليس لدينا هنا ذلك النوع من المنظومات المتحكم بها جيداً والتي يمكن للفيزيائيين أن يُجروا تجاربهم عليها. لا يمكن تجاهل حوادث خارجية، تلك التي يدعوها الاقتصاديون بالصدمات. لقد قُدِّمت جهود جدية لتحليل المعطيات المالية (المعروفة أكثر من المعطيات الاقتصادية) بأمل عزلِ منظومة ديناميكية معتدلة التعقيد، ولقد تبين برأيي أن هذه الجهود لاطائل منها. ونجد أنفسنا في موقعٍ مزعج حيث نلاحظ تطورات زمنية شبيهة بتلك التي للمنظومات الفيزيائية الشواشية، ولكنها مختلفة عنها لدرجة كافية لأن نعجز عن تحليلها[1].

الفصل الرابع عشر

تطورات تاريخية

إن ما يشكل المجال الطبيعي لتطبيقات أفكار الشواش هو التطورات الزمنية ذات "العودة الأبدية" « éternel retour ». في هذه التطورات تعود المنظومة دوماً إلى نفس الحالات، وبتعبيرٍ آخر، إذا كانت المنظومة في حالة ما في لحظة ما فإنها ستعود دون كلل وبشكلٍ اعتباطي إلى قرب هذه الحالة في لحظة لاحقة.

تُلاحَظ "العودة الأبدية" في التطور الزمني لمنظومات معتدلة التعقيد، ولكن ليس في تطور المنظومات المعقدة جداً، لماذا؟ هذا ما ستُظهره لك التجربة التي سأقترحها عليك الآن: احمل برغوثاً وضعه في إحدى مربعات رقعة شطرنجية، محاطاً بسياج (لمنعه من الهرب). سيقفز برغوثك هذا بنشاط في كل اتجاه، وبعد بعض الوقت، سيعود هذا البرغوث للمرور بالمربع الذي انطلق منه، كانت هذه حالة منظومة معتدلة التعقيد. ضع الآن مائة برغوث وأعطِ كل منها اسماً، أو ألصق عليه رقماً. ضع كل برغوث في مربع، ثم راقبها، كم من الوقت يلزمك لكي ترى كل البراغيث معاً في المربعات التي انطلقت منها؟

الحدس والحساب يُظهِران أنه يلزم زمن طويل جداً بحيث لن نرى هذا الأمر يحدث، لن نرى أبداً كل البراغيث تعود معاً إلى المواقع التي كانت عليها في لحظة سابقة؛ لن نرى خلال فترة مراقبة معقولة نفس الترتيب مرتين.

إذا لم يكن لديك مائة برغوث تحت تصرفك فإنه يمكنك القيام بمحاكاة حاسوبية مع بعض الفرضيات المناسبة عن طريقة قفز البراغيث من مربع إلى آخر، (لن نناقش هنا فرضيات مناسبة للاختيار) بعد مراقبتك جيداً براغيثك المائة، يمكنك أن تكتب مقالة تقنية تصف فيها نتائج دراستك، تحت عنوان "نظرية جديدة في اللاعكوسية"، وبدون شك سترغب بنشر مقالتك في مجلة فيزيائية وحيث أن التواضع لا يفيد مالياً، فإنك تبدأ مقالتك بعبارة مثل "لقد اكتشفنا آليةً جديدة تماماً لشرح اللاعكوسية، الخ" وتقدم موضوعك للنشر في **مجلة الفيزياء** المجلة الأميركية الشهيرة للفيزياء. بالطبع ستُرفض مقالتك، وستستلم ثلاثة نسخ لتقارير حكام يقولون أن مقالتك لا قيمة لها، وتشرح لك لماذا. لا تشعر بالإحباط، أعِد كتابة المقالة آخذاً في الاعتبار ملاحظات الحكام وقدّمها ثانية، وألحِق معها رسالة معتدلة الاستياء إلى المحررين مشيراً إلى التناقضات بين تقارير مختلف الحكام. سيعاني تقريرك بعض الذهاب والإياب، وستكون السبب في بعض قرحات المعدة، ولكن لا تنسحب. مع الوقت ستُقبَل مقالتك وستنشر في **مجلة الفيزياء**، وحين ذاك ستصبح فيزيائياً حقيقياً إذا لم تكن كذلك في السابق.

ولكن لنرجع الآن إلى العودة الأبدية، لماذا اختفت كلمة **اللاعكوسية**؟ أي نعم، إذا كنت تحب فكرة العودة الأبدية، فإن العالم المحيط بنا مخيب للآمال تماماً: تتكسر أواني المائدة ولا يمكننا إعادة تركيب القطع المكسرة معاً، الناس يهرمون ولا يعودون شباباً، وعموماً فإن العالم اليوم هو غير ما كان عليه سابقاً، باختصار يتصرف العالم بلاعكوسية. وجزءٌ من الشرح هو ببساطة: إذا كانت منظومة معقدة كفايةً، فإن الزمن اللازم لكي تعود إلى حالة كانت فيها سابقاً هو زمن كبير (فكر في المائة برغوث على الرقعة). إذا راقبت المنظومة خلال زمن معتدل الطول، فلن يكون هناك "عودة أبدية"، ومن الأفضل لك اختيار تصور آخر.

لنفترض مثلاً أنك عدت إلى براغيثك المائة، وأنك وضعتها كلها مبدئياً في مربع واحد، ستبدأ البراغيث بالقفز في كل الاتجاهات وتحتل بسرعة سطح الرقعة بالكامل. يمكنك أن تقترح نظرية تقول بأن البراغيث تميل إلى أن تغطي بشكل متجانس كل السطح المتاح لها. هذه النظرية جيدة كفاية، مع أنها لا تأخذ بفكرة العودة الأبدية، ومع أن البراغيث ليس لديها أية رغبة في تغطية سطح الرقعة بشكل متجانس، فكل ما تريده هو أن تقفز في كل الاتجاهات. إذا راقبنا الآن العالم المعقد الذي يحيط بنا، إذا درسنا تطور الحياة أو تاريخ الإنسانية، فإننا لا نتوقع رؤية العودة الأبدية. يمكن أن نرى العودة الأبدية لبعض المظاهر الخاصة للعالم، أو لمجموعات فرعية صغيرة، ولكن ليس لتطور المجموع ككل، فهذا التطور يتبع تقدماً تاريخياً

وحيد الاتجاه، وما ينقصنا الآن هو تمثيل رياضي مفيد له (يوجد مع ذلك بعض الأفكار المهمة سنناقشها لاحقاً). لنعد الآن إلى الموضوع الرئيسي لهذا الكتاب: المصادفة، سنحاول رؤية كيف أن التقدم التاريخي للعالم يمكن أن يتأثر بتغيراتٍ طفيفة في الشروط الابتدائية، مثل تلك التي كان مسؤولاً عنها الشيطان الصغير الذي ذكرناه في الفصل السابق. تتطلّب الكثير من النقاط مناقشةً مستفيضة، وسنتفحّصها الواحدة بعد الأخرى.

كما رأينا فإن شيطاننا ليس لديه أية صعوبة في تغيير الطقس، ونثر حبوب الطلع أو ثمار الهندباء في جهة أو أخرى. بهذا المعنى فإن قدر كل نبات معين هو عمل المصادفة، لكن ماذا عن الحيوانات؟ كما تعرف بدون شك، فإن أصل كل فرد يتطلب عدداً كبيراً من الحيوانات المنوية حيث أن أحدها، بعد ما يشبه السباق، يتحد مع البويضة الأنثوية. أترك لك مهمة التأمل في تفاصيل المسألة، ولكني أظن أنك ستصل إلى نتيجة محزنة. أن تعرف أن منابلات الشيطان الصغير هي المسؤولة عن دعوتك للوجود، بدلاً من أخ صغير أو أخت صغيرة مختلفة قليلاً عنك.

ولكن وبالرغم من اختلاف الأفراد، فإن المظهر العام للأشياء يبقى هو نفسه. يمكن أن نتنبأ بثقة أنه في مناخ معين، سيكون نوع من التربة مغطىً بغابة من السنديان. باختصار هناك عدة آليات للتحكم البيولوجي وللتوجه التطوري convergence évolutive، وللضرورة التاريخية nécessité historique التي تحاول أن تزيل

الشذوذات التي يرتكبها شيطاننا الصغير. والسؤال هو ما مدى فعالية هذه الآليات؟ هل تؤدي إلى الحتمية التاريخية، أي إلى الحتمية على مقياس المجموعات الكبرى للأفراد؟

ربما كان من الأفضل التكلم عن حتمية تاريخية جزئية، حيث أن بعض الحوادث العارضة من مثل تلك التي ينظمها شيطاننا لا يمكن إزالتها بالتطور التالي، بل إنها - كما يظهر - على العكس مثبتة إلى الأبد. لنأخذ مثالاً: كل الكائنات الحية المعروفة متشابهة وتستعمل بصورة رئيسية نفس **الرموز الوراثية**. بدقةٍ أكبر فإن المعلومات الوراثية مكتوبة كسلسلة من الرموز (أو **قواعد**) التي هي عبارة عن أبجدية مشكلة من أربع حروف، وتمثل كل مجموعة من ثلاث قواعد متتالية (من حيث المبدأ) حمضاً أمينياً يدخل في تركيب البروتين. يمكن أن نميز عشرين حمضاً أمينياً مختلفاً، ويرفق الترميز الوراثي بكل ثلاثية من القواعد واحداً من العشرين حمضاً أمينياً، هذا الترميز اعتباطي بالظاهر. إذا تطور شكل من أشكال الحياة الجديدة تماماً على سطح كوكب آخر لا نتوقع أن يستخدم نفس الترميز الوراثي الموجود لدينا. لقد تغير تركيب المخلوقات الحية التي تملأ الأرض تغيراً كبيراً خلال التطور عبر الطفرات والانتخاب، ولكن الرمز الوراثي أساسيٌ جداً حتى أنه بقي ذاته من حيث الأساس، مروراً من البكتيريا وحتى الإنسان. بدون شك كان هناك في الخطوات الأولى المترددة للحياة، تطوير للترميز الوراثي، ولكن عندما ظهرت منظومة فعالة، أزالت كل الرموز الأخرى وبقيت هي وحدها.

يُظهر المثال الذي ناقشته كيف أن صفةً اعتباطية يمكن أن يختارها التطور التاريخي، ومن ثم تبقى ثابتة بعد ذلك. هنالك أمثلة أخرى. يُظهر التطور التكنولوجي بخاصة عدداً من الحالات حيث كان لاختيارات اعتباطية نتائجُ لاعكوسة على المدى الطويل، وقد ناقش بريان أرثر[1] عدداً من هذه الحالات، فمثلاً يُلاحظ أن السيارات الأولى كان لها محركات إما ذات احتراق داخلي أو على البخار ولاقت نفس النجاح، وكان لنقص عرضي في المياه تأثير سيئ على المحركات البخارية. ومنذ ذلك الوقت حظيت المحركات ذات الاحتراق الداخلي باهتمامٍ أكبر، واستفادت من تقدم تكنولوجي أسرع بحيث أنها حلت محل المحركات البخارية. من الصعب بالتأكيد برهان نظرية كهذه، ولكن الفكرة الأساسية لـ بريان أرثر صحيحةٌ بدون شك: إذا كان لدينا تكنولوجيتان في وضع تنافسي، وإحداهما تستفيد من أفضلية عرَضية تسمح لها بتطور أسرع، فإن الفارق سيزداد حتى يتم حذف التكنولوجية التي لا أفضلية لها، (هذا يُذكِّر بالاعتماد الحساس على الشروط الابتدائية، ولكن من الوجهة الرياضية، تتعلق المسألة بشيء آخر). بشكلٍ عام من الواضح أن قرارات اعتباطية من مثل قرار القيادة على اليمين أم على اليسار في الطريق ليس من السهل تغييرها.

وهكذا فإن الحتمية التاريخية يجب أن تُصحَح (على الأقل) بملاحظة أن بعض الحوادث أو الخيارات التي لا يمكن التنبؤ بها، لها نتائج هامة. أظن أنه فعلياً يمكن القول أكثر من ذلك، أظن أن

التاريخ ينتج منهجياً حوادث لا يمكن التنبؤ بها ولها نتائج هامة على المدى الطويل. لا ننسى في الحقيقة أنه غالباً ما يؤخذ قرار مصيري من قبل رجل واحد، شخصية سياسية، وغالباً ما يأخذ قراراته بطريقة متوقعة وتحت ضغط الظروف، ولكن إذا كان هذا السياسي ذكياً ويتصرف بعقلانية فإن نظرية الألعاب (كما رأينا في الفصل 6) تجبره أن يُدخل عنصر المصادفة في قراراته. لن أقول أن كل شكل من أشكال التصرف العشوائي هو عقلاني، ولكن في حالات التنازع، غالباً ما يكون التصرف العقلاني عشوائياً بطريقة محددة تماماً، وعندما تؤخذ القرارات التي تصنع التاريخ بعقلانية، فإنها تُدخل غالباً عنصراً اتفاقياً لا يمكن التنبؤ به.

هذا لا يعني أنه يمكن لرئيس الحكومة أن يقول لجمهوره أنه اتخذ قراراً هاماً بالاعتماد على الطرة أو النقش. ربما كان هذا فعلاً ما قام به، وربما كانت هذه هي الطريقة العقلانية للتصرف. لكنه يجب أن يجد شيئاً آخر يدلي به للصحفيين، وأن يبرهن لهم أنه لم يكن هناك بديل آخر معقول لقراره. لقد كان لدى الرؤساء السياسيين والعسكريين سابقاً ضوابط أقل، وكانوا يدخلون عاملاً عشوائياً في قراراتهم بمشورة العرّافين. بالطبع إن الإيمان الأعمى بالكهانة هو غباء مطبق ويقود بسهولة إلى نتائج كارثية، ولكن التوظيف الحصيف للاتنبؤية الكهانية من قبل قائد ذكي يمكن أن يكون طريقة جيدة لتحقيق استراتيجية احتمالية مثلى.

الفصل الخامس عشر

الكمومات: إطار تصوري

لقد مررنا بعدة فصول في نقاش حالة الاعتماد الحساس على الشروط الابتدائية والمصادفة، ولقد استعنا في نقاشنا بنوع من تمثيل الواقع يدعى الميكانيك الكلاسيكي والذي يعود الفضل فيه بشكل كبير إلى نيوتن. ولقد ذكرت عدة مرات وجود تمثيل أفضل، الميكانيك الكمومي، والذي يرتبط نشوءه بأسماء ماكس بلانك، ألبرت أنشتاين، نيلز بور، لوي دو بروي، ماكس بورن، فيرنر هايزنبرغ، أروين شرودينغر، وكثيرين آخرين. لدراسة مظاهر أخرى للواقع (تلك التي تتعلق بمنظومات صغيرة مثل الذرات) ليس الميكانيك الكلاسيكي مناسباً، ويجب أن يستبدل بالميكانيك الكمومي. ولكن لأجل الحياة العادية، فإن ميكانيك نيوتن كاف تماماً ولا يجب أن نغير نقاشنا للمصادفة على هذا المستوى.

إن توظيف الميكانيك الكمومي لتوصف العالم الحالي يقدم من الوجهة الفلسفية، أهمية خاصة. في الواقع، تلعب **المصادفة** في الميكانيك الكمومي دوراً هاماً سأحاول بيانه.

يتضمن الميكانيك الكمومي مثل النظريات الفيزيائية الأخرى جزءاً رياضياً وآخر عملياتياً يشرح كيف تصف الرياضيات أجزاء معينة من الواقع الفيزيائي. يمكن تقديم كلا المظهرين: العملياتي كما الرياضي، بوضوح دون أن يكون هناك أية مفارقة منطقية. إضافةً لذلك، نلاحظ أن التوافق بين النظرية والتجربة مقنع تماماً. ومع ذلك فإن الميكانيك الجديد أدى إلى مجادلات عدة استدعت إدخال ظواهره الاحتمالية، وعلاقة تصوراته العملياتية مع تلك التي للميكانيك الكلاسيكي، وأيضاً شيئاً آخر وهو ما دعي **اختزال رزم الموجات** (**la réduction des paquets d`ondes**)، لم تنطفئ تماماً هذه المجادلات بعد، حيث يُعقّد المظهر القليل التقنية للرياضيات المستخدمة النقاش.

إذا كنت قد درست أم لم تدرس الميكانيك الكمومي، فإني أنصحك بقراءة كتاب صغير لـ ريتشارد فاينمان يدعى **QED**[1]. يقدم هذا الكتاب رؤية عميقة للبنية المفاهيمية للميكانيك الكمومي دون استدعاء رياضيات صعبة. سأكون هنا أكثر تواضعاً، ولن أبين إلا هيكل النظرية. ليس في الهيكل ما يضحك ولن أتوقف عنده كثيراً، ولكن يلزم القليل من التقديم لفهم كيف تظهر المصادفة في الميكانيك الجديد.

لنتذكر أنه في الميكانيك الكلاسيكي، تظهر المواضع والسرعات على أنها من الأفكار الأساسية، وأن التطور الزمني لهذه

المواضع والسرعات محكوم بمعادلة نيوتن، ولقد بحثنا في النظريات الاحتمالية حيث الموضوعات الأساسية هي الاحتمالات، وكان من الممكن تقديم قوانين التطور الزمني لهذه الاحتمالات. وللميكانيك الكمومي موضوعات أساسية تدعى **سعات** (أو **سعات الاحتمال**، وسنرى لماذا قريباً). هذه السعات هي أعداد عقدية تقوم هنا مقام الأعداد الحقيقية المعهودة أكثر[2]. يصف القسم الرياضي من الميكانيك الكمومي التطورَ الزمني للسعات: وتدعى معادلة التطور بمعادلة شرودينغر. من وجهة النظر الرياضية، ليس في هذه المعادلة أي سر كبير، ولكنها تقنية بما فيه الكفاية ولن نستطيع هنا أن نخصص لها إلا ملاحظة[3]، لنلاحظ أن للسعات تطوراً زمنياً حتمياً. يحوي القسم الرياضي من الميكانيك الكمومي أشياء تدعى **الملحوظات** observables، والملحوظات من الوجهة التقنية هي مؤثرات خطية opérateur linéaire، ولقد استهوى كثيراً مظهرها التجريدي الفيزيائيين الأوائل الذين استخدموها. وأخيراً إذا كان لدينا ملحوظة سندعوها (A) ومجموعة سعات، يمكننا أن نحسب عدداً يدعى القيمة الوسطية لـ A، والذي نرمز له بـ <A> للملحوظة (A)[4].

باختصار يخبرنا الميكانيك الكمومي كيف تتطور السعات مع الزمن، وأيضاً كيف تسمح هذه السعات بحساب القيمة الوسطية <A> للملحوظة A.

لكن ما هي الصلة بين هذه التصورات الرياضية والواقع الفيزيائي؟ سأفترض، ليكون نقاشي ملموساً أكثر، أنك تجريبي وأن

مجالك هو فيزياء الجسيمات: إنك تسرّع مجموعة من الجسيمات بطاقة عالية جداً، وترسلها نحو هدف، وتراقب ماذا يخرج منها، وقد أحطت الهدف بكواشف عدة III, II,I الخ، حيث ينطلق الكاشف إذا صُدِم من قبل جسيم من نوعٍ مناسب وفي لحظةٍ مناسبة (النوع المناسب يعني الشحنة المناسبة، الطاقة المناسبة... الخ، وتعني اللحظة المناسبة أنه الكاشف II مثلاً لاينطلق إلا بعد انطلاق الكاشف I، ولمدة زمنية محدودة). تُقرِر أن تدعو **الحدث** A الحالة التي تنطلق فيها الكواشف I وII، بينما لاينطلق الكاشف III (الحدث A هو الإشارة على نوع معين من الاصطدام الذي تظن أنك تراقبه في تجربتك).

و الآن ستراجع الكتب المقدسة للميكانيك الكمومي، والتي ستقول لك أيَّ ملحوظةٍ توافق الحدث A (تظهر الأحداث إذن كنوع خاص من الملحوظات). تقول لك الكتب المقدسة أيضاً كيف تحسب السعات الموافقة لتجربتك، يمكنك بعد ذلك تقدير قيمة <A>، حيث يؤكد مبدأ أساسي في العقيدة الكمومية أن <A> هي الاحتمال الذي يحققه الحدث A. بدقةٍ أكثر، إذا كررت تجربتك عدداً كبيراً من المرات، فإن نسبة الحالات التي تنطلق فيها كل الكواشف كما هو مطلوب هي: <A>. وهذا يؤمن العلاقة بين رياضيات الميكانيك الكمومي، والواقع الفيزيائي المعرّف عملياتياً.

لنلاحظ بالمناسبة أن بعض فصول الكتب المقدسة للميكانيك الكمومي لم تُكتب بعد، أو على الأقل ليس بطريقة نهائية، وبقول

آخر، إننا لا نعرف بعد كل تفاصيل التفاعلات بين الجسيمات بطريقة أكيدة، ولهذا يتابع الفيزيائيون التجريب.

سنفصّل في ما يلي حدثاً فيزيائياً معيناً في الميكانيك الكمومي، ولكن الوصف البياني الذي قدمته يكفي لمناقشة المسائل الأساسية. أُذكّر أننا ندرس سيرورة فيزيائية (مثلاً الاصطدام بين الجسيمات) بالقيام ببعض القياسات (مثلاً باستعمال الكواشف). تحدد مجموعة القياسات المجراة حدثاً، ويسمح لنا الميكانيك الكمومي بحساب احتمال هذا الحدث (ليس في فكرة القياس أي شيء سحري: إذا أردت معرفة ماذا يجري في كاشف، يمكنك إحاطته بكواشف أخرى، والقيام بقياسات وحساب الاحتمالات المقابلة بواسطة الميكانيك الكمومي). نحصل بهذه الطريقة على وصفٍ للعالم يختلف في العمق عن ذلك المعطى من قبل الميكانيك الكلاسيكي، ولكنه لا يُنتِج أية مفارقة منطقية.

إذا كان يسرك أن تقول أن الميكانيك الكلاسيكي هو حتمي، فإنه كذلك: تتنبأ معادلة شرودينغر دون لبس بالتطور الزمني لسعات الاحتمالamplitudes de probabilité.إذا كنت تفضل أن تقول أن الميكانيك الكمومي هو احتمالي، فيمكنك ذلك:القضايا الفيزيائية تتعلق فقط بالاحتمالات (قيمة هذه الاحتمالات هي أحياناً 0 أو 1، ونحصل حينذاك على الوثوق، ولكن ليست هذه هي الحالة عادةً).

مع أن الميكانيك الكمومي هو احتمالي فإنه ليس نظرية احتمالية بالمعنى المعتاد الذي بحثناه في الفصل الثالث. وبدقة أكثر،

لنتذكر أنه حين يُعرَّف حدثان "A" و"B" في نظرية احتمالية عادية فإن الحدث "A وB" هو أيضاً معرّف (بالمعنى البديهي: يقع الحدث "A وB" إذا وقع كل من الحدثان "A" و "B" معاً). على العموم في الميكانيك الكمومي "A وB" ليست معرّفة: ليست هناك من إشارة إلى "A وB" في الكتب المقدسة للميكانيك الكمومي. هذا مزعج بالتأكيد: لماذا لا نقول ببساطة أن الحادثة "A وB" تقع إذا ما وقعت "A" وأيضاً إذا وقعت "B"؟ هناك جواب مزدوج لهذا السؤال: رياضي وفيزيائي عملياتي. ما يحدث فيزيائياً هو أنه ليس لدينا كواشف تستطيع قياس "A" و"B" معاً (أي تتحقق في نفس الوقت فيما إذا كان الحدث "A" قد وقع والحدث "B" قد وقع أيضاً)، فبإمكانك أن تقيس "A" أولاً ثم "B"، أو "B" ثم "A"، ولكن الأجوبة على العموم مختلفة، ويُعبَر عن ذلك غالباً بالقول أن القياس الأول يشوش القياس الثاني. هذا التفسير البديهي، دون أن يكون حقيقةً خاطئ هو مع ذلك خدّاع قليلاً: إنه يعني أن الحدث "A و B" له في الحقيقة معنى، ولكننا لكعاء جداً لكي نلاحظها تجريبياً. وعلى العكس فإن النظرية الرياضية للميكانيك الكمومي هي بدون غموض: "A وB" ليس له معنى على العموم لأن الملحوظات A وB لاتُتبادل[5].

كل ما أكدناه فيما يتعلق بالأحداث الكمومية هو مجرد نوعاً ما. ماذا يمكننا أن نقول عن جسيم يتحرك على طول خط مستقيم؟ حسب الميكانيك الكلاسيكي كل ما نريد معرفته هو موضع x

وسرعة الجسيم v، ماذا عنها في الميكانيك الكمومي؟ لنفترض أن جسيماً يمكن أن يوصف ببعض سعات احتمالية. يمكننا بدراسة الأحداث: "x هو هنا" و"x هو هناك" أن نحدد احتمال وجود الجسيم في عدة أماكن (نتبين أن هذه الحوادث المختلفة المتعلقة بـ x هي ملحوظات يمكن مبادلتها، ولذا يمكن ملاحظتها معاً). نلخص نتائج دراستنا بالقول أن الجسيم هو قريب من النقطة 0x ولكن يوجد بعض الارتياب (أو خطأ محتمل) (Δx) في موضعه. وبنفس الطريقة يمكن أن نلخص الوصف الاحتمالي لسرعة الجسيم بالقول أنها قريبة من v0 بارتياب (Δy). إذا انعدمت سعات الاحتمال (Δx) و(Δy) التي توصّف جسيماً، حينذاك فإن الموضع والسرعة يصبحان محددين تماماً. ولكن هذا مستحيل لأنه لا يمكن مبادلة الملحوظات "x" و"v"، وقد برهن فرنر هايزنبرغ في عام 1926 أن:

$$m \Delta_x \Delta_y \geq h \big/ 4\pi$$

حيث m هي كتلة الجزيء و π = 3,14159000 و h كمية صغيرة جداً تدعى **ثابت بلانك**. المتراجحة السابقة هي **علاقة الارتياب الشهيرة لهايزنبرغ**، وهي تبين بوضوح الطابع الاحتمالي للميكانيك الكمومي.

و لكن كما قلنا، ليس الميكانيك الكمومي نظرية احتمالية بالمعنى المعتاد. لقد بيّن الفيزيائي جون بل John Bell، بدراسة منظومة فيزيائية بسيطة، أن الاحتمالات المرتبطة بهذه المنظومة تحقق متراجحات لا تتوافق مع الوصف الاحتمالي العادي. تُظهر نتيجة بل كم أن الميكانيك الكمومي بعيد عن البديهة المعتادة[6].

كان هناك، كما هو متوقع، جهودٌ شجاعة (خاصةً لدى الفيزيائي دافيد بوم) لتقريب الميكانيك الكمومي من الأفكار الكلاسيكية. إنّ أعمالاً كهذه هي جهود محترمة وضرورية، ولكن النتائج المحصلَة تستدعي تراكيب construction غير طبيعية، يعتبرها معظم الفيزيائيين ضعيفة الإقناع. توجد إحدى المحاولات التي أُجريت لتقريب الميكانيك الكمومي من الحدس الكلاسيكي المعتاد في **الكتب المقدسة للميكانيك الكوانتي**... وقد أوجدت الكثير من الصعوبات. إنه الاعتقاد باختزال رزم الموجات الذي يتعلق بالقياس المتتالي للحوظتين A وB، ويقترح القول ما هي سعات الاحتمال بعد قياس A وقبل قياس B.

كما قلنا فإن هذا الاعتقاد dogme يؤدي إلى صعوبات، ومن الأفضل نسيانه، (من وجهة النظر الفيزيائية من المهم فقط أن يكون بالإمكان تقدير الاحتمال الموافق لـ "A ثم B").

مع كل الاحترام للآباء الذين كتبوا الكتب المقدسة، فإن الفيزيائيين المعاصرين يفضلون على العموم عدم الاهتمام باختزال رزم الموجات. مثلاً لا يورد فاينمان في كتابه QED أيَّ ذكرٍ للموضوع إلا في ملاحظة مختصرة في أسفل الصفحة ويكتفي بالقول أنه لا يريد سماع ذكرها[7].

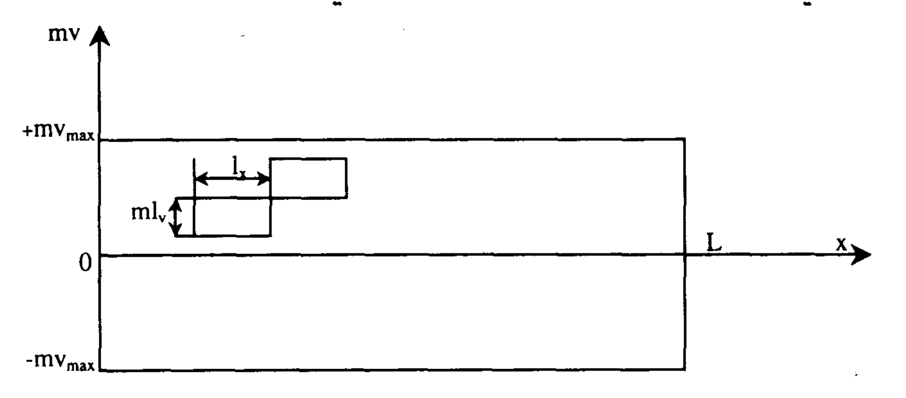
الفصل السادس عشر

الكمومات: تعداد الحالات

لقد تفحصنا في الفصل السابق الهيكل التصوري للميكانيك الكمومي، ولكن لم نجد لحماً فيزيائياً كثيراً على هذا الهيكل. وهذا ما وجدناه باختصار: يعطي الميكانيك الكمومي قواعد لحساب الاحتمالات لمختلف الحوادث، إذن فهو نظرية احتمالية، ولكنه ليس بنظرية احتمالية من النوع المعتاد، لأنه لا يمكن على الغالب تحديد الحدث "A وB"لحوادث معطاة "A" و"B" فيه.

إن لحم الميكانيك الكمومي يكمن بالطبع في القواعد، في تطبيقات هذه القواعد على مسائل محددة، وفي فهم الآليات الفيزيائية التي تنتج عنها. ليس هنا المكان المناسب للدخول في نقاش تقني حول الميكانيك الكمومي، ولكنه من السهل والمفيد أن نطور القليل من الحدس الفيزيائي. يجب أن لا ننسى مع ذلك أنه حين يطور الفيزيائيون حجةً حدسية فإنهم يتحققون منها بحسابات قد تكون شاقة. هنالك دوماً نوعٌ من الغموض في العرض غير التقني للعلم، عرضٍ يتحاشى كل حساب شاق: على المستوى التقني الأمور أقل سهولة، ولكنها أيضاً أقل غموضاً.

سأقوم الآن بتقديم حساب بسيط لا يستدعي أكثر من رياضيات وفيزياء المدرسة الثانوية، هذا الحساب ليس مما لا يُستغنَى عنه لقراءة ما سيلي، ولكنه يستحق الجهد الصغير الذي سنخصصه له.



الشكل1 : فضاء أطوار جزيء.

المستطيل الكبير هو المنطقة المتاحة للجسيم. يقيس المستطيل الصغير المهشر مقدار الإبهام المفروض من قبل الارتياب الكمومي.

سندرس - كما في الفصل الأخير - جسيماً ذو كتلة m يتحرك على طول خط مستقيم، ولنضع الآن هذا الجزيء في صندوق. بالدقة نفرض على الموقع x للجزيء أن يكون ضمن مجالٍ بطول L. نفرض أيضاً على سرعة الجزيء v أن تكون محصورةً بين vmax- وvmax (يمكن للجزيء أن يذهب إما إلى اليسار أو إلى اليمين بسرعةٍ قصوى vmax). إذا رسمنا خطاً بيانياً للموقع x وللجداء mv (الكتلة في السرعة)، نرى أن المنطقة المسموح بها للجزيء هي المستطيل الكبير في الشكل1. ولكننا يمكن أن نختار حالة الجزيء وهي مجمعة في

منطقة أصغر: المستطيل الصغير المهشر ذو الأضلاع lx وmlv. لأجل هذه الحالة، يحدد الموقع x بارتيابٍ حوالي x1/2، وتحدد السرعة بارتيابٍ حوالي lv/2، وحسب علاقة الارتياب لهايزنبرغ يجب أن نختار lx وlv بحيث تكون $m.\ lv\ .\ lx \geq h/\pi$. في الحقيقة تظهر دراسةٌ أكثر دقةً أن أفضل ما يمكننا عمله هو أن نأخذ:

$$m\ lv.\ lx = h$$

وهو ما يعني أن سطح المستطيل المخطط هو h. يدعى فضاء المتحولات x وmv فضاءَ الأطوار. لقد رسمنا مستطيلاً صغيراً آخر ضمن فراغ الأطوار مفصول عن الأول، وبالتالي يقابل حالةً مختلفة تماماً لجسيمنا. كم يوجد من الحالات المختلفة تماماً؟ العدد المطلوب هو سطح المستطيل الكبير مقسوماً على سطح المستطيل الصغير أي:

$$\text{عدد الحالات المختلفة} = \frac{2mv_{\max}\,l}{h}$$

و يؤيد هذه النتيجة حسابٌ تقني جدي[1]. من الواجب أن نلاحظ أيضاً أنه إذا كان عدد الحالات المختلفة محدداً تماماً، فإنه يمكن اختيار هذه الحالات بطرق مختلفة (إن سطوح المستطيلات الصغيرة ثابتة وتساوي لـ h، ولكن يمكن اختيار شكلها بعدة طرق مختلفة).

لنهتم الآن بطاقة جسيمنا، أعني الطاقة الناتجة عن السرعة، والتي ندعوها بالطاقة الحركية. إذا كان لديك شهادة لقيادة السيارات في بلد ذي مستويات فكرية مرتفعة، ربما كان من الواجب

أن تعرف علاقة الطاقة الحركية لكي تقدم امتحان السواقة. على أي حال ها هي العلاقة:

الطاقة الحركية = $\frac{1}{2}mv^2$

(الطاقة الحركية تساوي نصف حاصل جداء الكتلة بمربع السرعة: إذا صدمت سيارتك ذات الكتلة m والسرعة v بحائط، فهذه هي كمية الطاقة الجاهزة لتحطيم الجدار، وسيارتك، وإرسالك إلى المشفى). إذن يكافئ قولنا بأن جسيمنا له سرعة محصورة بين $-v_{max}$ و v_{max} القول أن طاقته (الحركية) تساوي على الأكثر:

$$E = \frac{1}{2}mv^2$$

النتيجة هي أننا إذا حصرنا جسيماً في صندوق، وفرضنا عليه أن تكون له قيمة محددة من الطاقة، حينذاك لا يمكن أن يكون لهذا الجسيم إلا عددٌ محدودٌ من الحالات. هناك نوع من الاعتباطية في طريقة اختيار هذه الحالات، ولكن دراسةً تقنية تظهر أنه يمكن اختيارها بحيث يكون لكلٍ منها طاقةٌ محددة تماماً. هذا ما يعبر عنه عندما يقال أن الطاقة مكممة: لا يمكنها أن تأخذ إلا قيماً منفصلة. إن تكميم الطاقة هو مظهر أساسي من مظاهر الميكانيك الكمومي، ومعاكسٌ تماماً لبديهيات الميكانيك الكلاسيكي.

لنأخذ الآن بدلاً من جسيم يتحرك على خط مستقيم، جسيماً حراً في الحركة في الأبعاد الثلاثة للفراغ ولنضع هذا الجزيء في صندوق حجمه v. يمكننا حينذاك حساب عدد حالات الجسيم التي لها

طاقة أقل من قيمة معطاة (E)، (يستخدم الحساب علاقات الارتياب الثلاثة لهايزنبرغ، من أجل اتجاهات الفراغ الثلاثة)، وها هي العلاقة التي نحصل عليها:

عدد الحالات = $\frac{1}{h^3}\frac{4}{3}\pi(2mE)^{3/2}.v$

يعرف المحترف من نظرة أن الأمر يتعلق بالحجم المتاح في فراغ الأطوار مقاساً بواحدة h^3. لفراغ الأطوار هنا 6 أبعاد وهي تعطي موضع x للجزيء وأيضاً المتجهة mv (الكتلة جداء السرعة).

أن تستطيع أن تقول شيئاً عميقاً عن الكون الفيزيائي بمنابلة بعض الرموز مثل h أو يمكن أن تذكر بالسحر. وبالنتيجة إن علاقة كتلك التي كتبتها سابقاً تثير الاشمئزاز العارم عند بعض الأشخاص، بينما تثير حماساً مبالغاً فيه لدى آخرين. بالطبع يقف الفيزيائيون إلى جانب المتحمسين، راضين عن دورهم المهني كسحرة عصريين. مع ذلك، ولأجل هذا الكتاب سأتبنى وجهة نظرٍ قليلة الحرفية، ولن أكتب أية علاقة.

ولكنني أرى أنك لاتزال تريد أن تعدَّ الحالات، وبدلاً من أن تضع جسيماً في صندوق، تريد أن تضع الكثير من الجسيمات. في الواقع أنت تريد أن تستعمل كجسيمات ذرات الآزوت، أو الأوكسجين، أو الهليوم أو ذرات غازات أخرى، وتريد أن تعرف ماذا يمكن أن يقال لأجل لترٍ من الغاز موضوع البحث. في درجة حرارة وضغط نظاميين، يحوي لتر من الغاز حوالي:7.2×1022 ذرة أي:

27000000000000000000000 (ثلاثة وعشرون رقماً). حاسبة الجيب تستعمل ربما الرمز 7,2 E 22 لهذا العدد، بينما يحب كتّاب العلم العامي أن يكتبوا "سبعة وعشرون ألف مليون مليون المليون"، ولكن هذه اللغة الخرقاء تسبب الإحباط. مهما يكن تريد أن تعرف كم من الطاقة الإجمالية محتواة في لتر من الهليوم، الاختيار الأفضل أن تأخذ الطاقة المتعلقة بحركة ذرات الهليوم في درجة حرارة محيطية نظامية. بقول آخر، تريد أن تعرف في كم من الحالات الكمومية المختلفة يمكننا أن نجد لتراً من الهليوم في درجة حرارة عادية، (بدلاً من القول بدرجة حرارة عادية يجب القول **مع طاقة إجمالية لا تتجاوز تلك التي للتر من الهليوم في درجة حرارة عادية**، ولكن هذا، وهذه نقطة سنعود إليها، لايؤثر بأي شكل على النتيجة). وهاكم الجواب[2]:

عدد الحالات = 1 E 50000000000000000000000

من الأحسن كتابته على الشكل 5 متبوعاً بـ 22 صفراً بالشكل 22E5، ولكننا كنا قد وضعنا "E"، أليس هذا بخطأ؟ كلا، فعدد الحالات يحوي عدداً من الأرقام هو 22E5 ولذا يمكن كتابته 22E5E1. إذا أردت كتابة هذا العدد بنشره (in extenso) على ورقة، يلزمنا ورقة كبيرة، وستتوفى قبل أن تنهي عملك الكتابي هذا.

أعداد مثل تلك 22E5E1 هي بعيدة جداً عن الحدس العادي، وتثير من جديد لدى البعض اشمئزازاً عارماً، ولدى آخرين حماساً مبالغاً فيه، أما الموقف المعقول هو إدخال التعريف التالي:

الأنطروبية = عدد أرقام عدد الحالات

(= 22E5 في الحالة المذكورة).

وتُعرَّف الأنطروبية - بتعبيرٍ أكثر رياضيةً - بلوغاريتم عدد الحالات (مضروباً بعامل تناسب k facteur de propotionnalité):

الأنطروبية =k × log (عدد الحالات)

التفاصيل قليلة الأهمية: تستطيع استخدام التعريف الذي يسرك أكثر.

وهكذا تظهر الأنطروبية كحيلةٍ لتقديم عدد على شكل مرصوص من الصعب التعامل معه دون ذلك، ولكن فوائد الأنطروبية لا تتلخص في هذا، إنها بشكل عريض: تصور ذو أهمية رياضية وفيزيائية أساسية. الفكرة المفتاح هي الآتية: تقيس الأنطروبية (الاعتلاج) كمية المصادفة المتواجدة في منظومة ما. وبصورة خاصة فإن الأنطروبية للترين من الهليوم تعادل مرتين الأنطروبية للتر واحد، الأنطروبية لـ 10 لترات تعادل 10 مرات (في حرارة وضغط نظاميين)، وبقول آخر أنطروبية منظومة تتناسب مع مقاس هذه المنظومة.

الفصل السابع عشر

الأنطروبية (الاعتلاج)

للتفكير بشكلٍ جدي في مسألة علمية صعبة، يمكن سلوك طرق مختلفة، فالبعض يبقى جالساً على طاولة العمل ومحدقاً بتمعن مؤلم في ورقة بيضاء، والبعض الآخر يسير متجهماً بالطول والعرض، أما شخصياً، فإنني أحب الاستلقاء على ظهري وإغلاق عيناي. يمكن للإنسان القيام بعمل علمي شاق، بينما يظهر وكأنه يأخذ غفوة. يمكن أن يكون التأمل العلمي تجربة غنية جداً، ولكنه أيضاً عمل شاق؛ يجب تتبع الأفكار دون كلل، وحتى الهوس، أما إذا تبين أن هناك إمكانية مهمة قد ظهرت، يجب تتبعها والتحقق منها، وبعد ذلك قد نحتفظ بها وعلى الغالب نسقطها. يجب تطوير أفكار عامة وجريئة، ومن ثم يجب التحقق من التفاصيل، وآنذاك وعلى الأغلب نكتشف عيوباً كارثية، وعلينا حينذاك إعادة البناء من جديد، وربما علينا التخلي عن بعض الأفكار وتنظيم ما يبقى بشكل آخر. والسيرورة تتالى يوماً بعد يوم، أسبوعاً بعد أسبوع، شهراً بعد شهر. الكثير ممن يصفون نفسهم بالعلماء لا يعملون بجد، بالطبع: توقف

الكثير منهم منذ زمن بعيد، وآخرون لم يبدؤوا أبداً، أما هؤلاء الذين يلعبون اللعبة دون خداع، ولا يكتفون بالتظاهر، بالنسبة لهؤلاء يكون اللعب شاق وقاس ومتعب ومنهك، وإذا استقبل أحدهم ثمرة هذا التعب ونتيجة هذا العمل بالعجرفة والاحتقار، فإن النهاية ستكون مأساوية. تخيل رجلاً فهم مغزى أحد المظاهر الأساسية للطبيعة، وتابع سنة بعد سنة أبحاثه بالرغم من تهجمات وعدم فهم معاصريه، والآن هو هرم، مريض وحزين. هذا ما حدث للفيزيائي النمساوي لودفيغ بولتزمان Ludwig Boltzmann، لقد انتحر في 5 إيلول 1906 :وكان عمره 62 سنة.

قام بولتزمان Boltzmann والأمريكي ج.ويلارد جيبس J.Willard Gibbs بابتداع علمٍ جديد دعي ***بالميكانيك الإحصائي*** (mécanique statistique)، ولم يكن إسهامهما بالنسبة لفيزياء القرن العشرين بأقل أهمية من اكتشاف النسبية أو الميكانيك الكمومي، ولكنه من طبيعة أخرى. فبينما قامت النسبية والميكانيك الكمومي بتحطيم نظريات موجودة واستبدالها بشيء آخر، قام الميكانيك الإحصائي بثورةٍ هادئة. فالبرغم من أنه وظف نماذج فيزيائية موجودة سابقاً، ولكنه أقام علاقات جديدة وأدخل تصورات جديدة. لقد تكشفت البنى المفاهيمية الجديدة التي يعود الفضل في وجودها إلى بولتزمان وجيبس، عن كونها أدوات قوية بشكل مدهش، وأخذنا نطبقها الآن على مختلف المواقف حتى تلك البعيدة جداً عن المسائل الفيزيائية التي انطلقت منها..

كانت نقطة البداية بالنسبة لبولتزمان هي الفرضية الذرية: فكرة أن المادة مكونة من عدد كبير من كرات صغيرة تتحرك بهيجان جنوني. في نهاية القرن التاسع عشر، في العصر الذي عمل بولتزمان فيه، لم يكن التركيب الذري للمادة مبرهناً بعد، وكان بعيداً عن أن يكون على العموم مقبولاً. لقد كان اعتقاد بولتزمان بوجود الذرات أحد أسباب الهجوم ضده، إلا أنه لم يكتف بالاعتقاد بوجودها فقط بل كان يأخذ تركيبها الذري على محمل الجد، واستنتج منه نتائج مدهشة.

في العصر الذي كان بولتزمان يعمل فيه لم يكن تحت تصرفه إلا الميكانيك الكلاسيكي، مع أنه كان من الأفضل تقديم بعض أفكاره في صيغ لغة كمومية. بعد كل شيء هناك علاقة قوية بين الميكانيك الكلاسيكي والميكانيك الكمومي، كلاهما يجب أن يصف نفس الواقع الفيزيائي، مثلاً يقابل **عدد الحالات** في الميكانيك الكمومي **فضاء الأطوار** في الميكانيك الكلاسيكي. سأؤكد إذن على الأفكار، ولن أهتم كثيراً بالمفارقات التاريخية للتفاصيل.

لقد ركّزت الثورة الصناعية في القرن التاسع عشر اهتماماً كبيراً على الآلة البخارية، وعلى تحويل الحرارة إلى طاقة ميكانيكية. كان معلوماً أنه من السهل تحويل الطاقة الميكانيكية إلى حرارة (بحف حجر بآخر مثلاً) ولكن ليس العكس. الحرارة هي نوع من الطاقة، ولكن استعمالها محدود بقواعد صارمة. من السهل

مثلاً خلط لتر من الماء البارد مع لتر من الماء الساخن للحصول على لترين من الماء الدافئ، والآن حاول فصل هذين اللترين الدافئين لاسترجاع اللتر البارد واللتر الحار! لن تستطيع ذلك: إن مزج الماء الساخن بالماء البارد هو سيرورة لاعكوسة.

لقد قام الفيزيائيون بخطوة هامة في فهم اللاعكوسية بتعريفهم **للأنطروبية** (لننسى أننا قد استعملنا هذه الكلمة في الفصل السابق). للتر من الماء البارد شيء من الأنطروبية، وللتر من الماء الساخن أنطروبية مختلفة، يمكن حساب هذه الأنطروبيات انطلاقاً من معطياتٍ تجريبية (ولكننا لن نشرح هنا كيف يمكن ذلك). تعادل أنطروبية لترين من الماء البارد مرتين أنطروبية لتر واحد من الماء البارد، وكذلك للماء الساخن.

إذا وضعت لتراً من الماء البارد قرب لتر من الماء الساخن، فإن لأنطروبيتهما قيمة محددة، ولكن إذ خلطت الآن اللترين، فإن أنطروبية اللترين الدافئين أكبر من تلك السابقة. بمزجك الماء الساخن بالماء البارد تكون قد زدت أنطروبية الكون لاعكوسياً، وهذه هي القاعدة المعروفة بـ: القانون الثاني للترموديناميك[1]. في كل سيرورة فيزيائية، إما أن تبقى الأنطروبية ثابتة خلالها أو تزداد، وإذا زادت فتلك السيرورة لاعكوسة.

كل هذا غامض جداً بالتأكيد، وليس مقنعاً تماماً. ما مغزى الأنطروبية؟ ولماذا تزداد دوماً ولا تتناقص أبداً؟ هذه هي بالضبط المسائل التي حاول بولتزمان حلها.

إذا كنت تعتقد بـ "الفرضية الذرية" فإنه يمكن للذرات المكونة للتر الماء البارد أن تكون في كل أنواع التشكيلات المختلفة. باللغة الكمومية، لدينا منظومة من عدد كبير من الجسيمات، وهذه المنظومة يمكن أن تكون في عددٍ كبير من الحالات المختلفة. ولكن مع أن هذه الحالات هي مختلفة في تفاصيلها الميكروية (الصغرية) فإنها جميعها متشابهة إذا نظرنا إليها بالعين المجردة؛ في الحقيقة كلها تتشابه مع لتر من الماء البارد.

إذاً عندما نتكلم عن لتر من الماء البارد فإننا نتكلم عن شيء غامض جداً، واكتشاف بولتزمان هو أن الأنطروبية تقيس هذا الغموض. من الوجهة التقنية، ينص التعريف الصحيح على أن أنطروبية لتر من الماء البارد هي عدد أصفار عدد الحالات الميكروية المقابلة لهذا اللتر من الماء البارد، وبالطبع فإن التعريف يشمل الماء الساخن، ومنظومات أخرى كثيرة. وفي الحقيقة لقد عرَّفنا بنفس الطريقة أنطروبية لتر من الهليوم في الفصل السابق.

مع ذلك فإن التعريف في الفصل السابق لم يكن له باعث فيزيائي. تكمن أهمية فكرة بولتزمان في أنها تقيم صلة بين تصور رياضي طبيعي وبين كمية فيزيائية كانت حتى ذلك الحين غامضة. من الوجهة التقنية من الأفضل القول **لوغاريتم** بدلاً من **عدد الأصفار**، مضروباً بثابت k (في الحقيقة يدعى الثابت k بثابت بولتزمان)، ومضيفاً ربما ثابتاً آخر للنتيجة، ولكن لا مكان هنا لمناقشة هذه التفاصيل.

لنضع اللترين بجانب بعضهما منفصلين دون أن نمزجهما سويةً، من أجل كل حالة للتر الماء البارد وحالة للتر الماء الساخن لدينا حالة موافقة للمنظومة الكلية، وبالتالي عدد حالات المنظومة الكلية يساوي لجداء عدد حالات لتر الماء البارد بعدد حالات لتر الماء الساخن. وبالتالي أنطروبية المنظومة الكلية تساوي لمجموع أنطروبية اللترين المشكلين للمنظومة، وهذا ليس مدهشاً و ينتج مباشرةً من التعريف.

ماذا يحدث الآن إذا خلطنا اللترين معاً؟ سنحصل على لترين من الماء الدافئ، ولازالت تفاصيل هذه السيرورة غير البسيطة موضوع دراسة للمختصين. أما ما هو معرّف بشكل جيد فهو حقيقة أن عدد حالات لتري الماء الدافئ أكبر (أكبر بكثير!) من تلك التي للتر من الماء البارد ولتر من الماء الساخن(2). ولا ننسى أن جميع حالات لتري الماء الدافئ متشابهة عندما نلاحظها بالعين المجردة: لا توجد وسيلة لمعرفة ماذا ينتج في مزيج من الماء الساخن والبارد. والخلاصة أن الأنطروبية تزداد بنتيجة المزج.

لكن لماذا يجب أن يكون هنالك لاعكوسية؟ يتصرف العالم الذي حولنا بطريقة جد لاعكوسة، لكن كيف يمكن برهان أنه يجب أن يكون كذلك؟ في العلم، عندما لا نرى كيف يمكن برهان موضوع معين، من المفيد التفكير ببرهان العكس ورؤية ماذا ينتج. وهذا ما سأحاوله للحصول على اللاعكوسية.

لا يوجد أبداً لاعكوسية في القوانين الأساسية للميكانيك الكلاسيكي. لنلاحظ الحركات والتصادمات التي تحدث خلال

ثانية في نظام من الجزيئات، ولنفرض أنه يمكننا عكس أشعة السرعة لجميع الجزيئات، بحيث تعود جميع هذه الجزيئات في الاتجاه المعاكس، وستحدث التصادمات بترتيب معاكس لذلك الذي شاهدناه سابقاً، و بعد ثانية سنعود من جديد إلى وضع الانطلاق (إن اتجاه أشعة السرعة خاطئ، ولكن بإمكاننا إعادتها إلى وضعها الصحيح بعكسها مرة أخرى، بوساطة عصىً سحرية). نلاحظ بعد ما قلناه أنه إذا كان من الممكن للأنطروبية أن تزداد، فمن من الممكن أن تنقص أيضاً، ولن يكون هنالك لاعكوسية. هل أخطأ بولتزمان؟ أم أننا أهملنا نقطة تفصيلة أساسية؟

لقد رتبنا الأمور بحيث "أعدنا الزمن إلى الوراء" وذلك بعكس أشعة السرعة لجميع الجزيئات المشكلة لنظام كبير بواسطة عصىً سحرية. بالطبع يمكننا أن نقول أن هذا مستحيل عملياً، لكن شيئاً مشابهاً جداً يمكن حدوثه بالنسبة لبعض الأنظمة (الأنظمة ذات الدوران systèmes de spin). لكن من المزعج تأسيس قانون عام في الفيزياء على استحالة عملية قد تُتَجاوز يوماً ما.

توجد صعوبة أدق في تجربة عكس أشعة السرعة التي كنا في صدد توصيفها، وينتج هذا العائق من الاعتماد الحساس على الشروط الابتدائية. عند تطبيق قوانين الميكانيك الكلاسيكي على دراسة الحركات والتصادمات في نظام من الذرات والجزيئات نتخيل أن منظومتنا لا تتفاعل مع باقي الكون الذي حولنا، لكن هذه الفرض

غير واقعيٍ بتاتاً. حتى التأثير التجاذبي لإلكترون موجود على حدود الكون هو تأثير مهم ولا يمكننا إهماله. إذا عكسنا أشعة السرعة للجزيئات بعد ثانية من مراقبة المنظومة، فإننا لن نشاهد الزمن يعود إلى الوراء. فبعد زمنٍ قصير جداً سيغير الإلكترون الموجود على حدود الكون تسلسل الأخداث، ولن يكون لدينا أي سبب للاعتقاد بأن الأنطروبية ستتناقص، (في الواقع، ستستمر الأنطروبية في الازدياد، لكن يبقى لنا أن نفهم سبب هذه الازدياد العام في الأنطروبية).

إن حقيقة وجود علاقة بين ظاهرة الاعتماد الحساس على الشروط الابتدائية واللاعكوسية لم تُفهم تماماً في عصر بولتزمان. يمكننا الآن أن نرى كم تتناسب أفكار بولتزمان وتأخذ مكانها في الإطار الفيزيائي الذي وُضع بعده، ولكن في عصره كانت المواضيع بعيدة تماماً عن الوضوح. لقد كان بولتزمان يعلم تماماً أنه على حق، أما الآخرون فلم يروا سوى أن أعماله كانت مؤسسة على الفرضية الذرية المشكوك بها، وكانوا ينظرون إلى بولتزمان على أنه يستخدم رياضيات مشكوك بها للحصول على تطور زمني لاعكوس انطلاقاً من قوانين الميكانيك الكلاسيكي والتي هي قوانين عكوسة بوضوح، ولم يقتنعوا...

الفصل الثامن عشر

اللاعكوسية

هدف الفيزياء هو إعطاء توصفٍ رياضي دقيق لأجزاء من الواقع، ومن المستحسن غالباً عدم الاهتمام كثيراً "بالواقع الكلي" réalité ultime قد يظهر هذا الموقف متواضعاً جداً وقليل الطموح، ويمكن أن نستنتج من هذا أن دراسة الفيزياء هي مهمة مضجرة بما فيه الكفاية. في الواقع العكس هو الصحيح، وهذا لأن الواقع الفيزيائي هو بعيدٌ كل البعد عن أن يكون مضجراً، فالفيزياء ممتعة لأن موضوعها هو العالم الممتع. إذا تناسينا هذا العالم الفعلي وتظاهرنا بالاهتمام بالفيزياء المجردة (in abstracto)، فإننا نجازف كثيراً بالغرق في اعتباراتٍ ميتافيزقية مضجرة وغير مفيدة.

تنطبق هذه الملاحظات بشكل خاص على عمل بولتزمان، الذي كانت نقطة انطلاقه هي الترموديناميك، هكذا تسمى النظرية التي تعالج الأنطروبية واللاعكوسية على المستوى الماكروي (الكبري) تأخذ هذه النظرية جيداً بالحسبان الوقائع التجريبية، وتستمر في أخذها لهذه الوقائع بعين الاعتبار. كانت المهمة الكبيرة لحياة

بولتزمان محاولةَ فهم الترموديناميك في إطار "الفرضية الذرية" من خلال إنجازه ما ندعوه اليوم ***الميكانيك الإحصائي***. لنتخيل أننا لم نستطع أبداً البرهنة بشكلٍ أكيد على وجود الذرات، لنتخيل أن الميكانيك الإحصائي لم يملك أبداً القدرة التنبؤية إلا في عصر بولتزمان، هذا يعني أنه في نظر فيزيائي، القول بأن نظرية بولتزمان صحيحة فيزيائياً هو قولٌ لا معنى له. لقد أصبحت نظرية بولتزمان الحقيقة الفيزيائية لأنه تم الآن البرهان أن المادة مكونة من ذرات، ولأنه أمكن التحقق تجريبياً من علاقة الأنطروبية لبولتزمان، ولأنه أصبح للميكانيك الإحصائي قيمة تنبؤية كبيرة (يرجع هذا إلى الفضل الكبير لجهود جيبس وفيزيائيين آخرين).

إذا نظرنا في هذا عن قرب، لرأينا أن أفكار بولتزمان عن الذرات كانت بعيدةً عن "الحقيقة النهائية": الذرات ليست ببساطة كرات صغيرة تتحرك بهيجان، بل إن لها تركيباً معقداً، والميكانيك الكمومي ضروريٌ لتوصيفها. إن الأفكار المسبقة لبولتزمان حول طبيعة الأشياء أفادته (وكذلك أفادتنا نحن)، ولكنها لا تشكل إلا مرحلةً في تحليلنا للعالم الفيزيائي، فهل هناك مرحلة نهائية؟ هل هناك "حقيقة نهائية" في الفيزياء؟ نأمل أن يكون الجواب على هذه الأسئلة إيجابياً، وأن تُكتشف النظرية النهائية للمادة (وتُبرهن صحتها) خلال حياتنا. ولكن يجب أن نقول بوضوح أن أهمية أفكار بولتزمان لاتعتمد على الاكتشاف المحتمل لنظرية فيزيائية نهائية للمادة.

في حياة بولتزمان شيء من الرومانتيكية، لقد انتحر لأنه بمعنى ما فاشل، ولكن مع ذلك فإننا نعتبره اليوم أحد كبار علماء عصره، أهم بكثير من أولئك اللذين كانوا معارضين علميين له. لقد استطاع أن يرى بوضوح قبل الآخرين، ولقد كان معه الحق في وقت مبكرٍ جداً. ولكن ماذا علينا فعله لكي نرى بوضوح قبل الآخرين؟ أظن أن الآراء المسبقة idées préconçues هي جزءٌ من الجواب. يجب أن يكون لدينا آراء مسبقة حول الفيزياء، آراء مختلفة عن العقيدة المقبولة عموماً، ويجب أن نتبع هذه الأفكار بقسطٍ من الإصرار والعناد. قد تتكشف لنا هذه الآراء عن كونها سيئة في مناسبات أخرى، ولكن إذا كان لديك الرأي المناسب والحظ، فإن هذه الأفكار ستعطيك مفتاح فهمٍ جديد للطبيعة. لقد كانت أفكار بولتزمان ميكانيكية صافية، مثل أفكار ديكارت سابقاً، ولكن تحيزات ديكارت الميكانيكية لم تكن منتجة، وكان نيوتن بأفكار أخرى هو الذي أسس الفيزياء الحديثة. مع ذلك كانت التحيزات الميكانيكية في عصر بولتزمان هي المطلوبة لفهم الترموديناميك، ويمكن الآن للأفكار الميكانيكية أن تنتصر.

لنعط بعض الأمثلة الأخرى للأفكار المسبقة حول العلم: أن الرياضيات هي لغة الطبيعة (غاليله)، أن عالمنا هو أفضل العوالم الممكنة (لايبتنز)، أن قوانين الطبيعة يجب أن تحقق معايير جمالية (أنشتاين). في كل عصر هناك في العلم موضة معينة من التحيزات،

وأفكار أخرى مسبقة ليست على الموضة ولكنها يمكن أن تجعلك مشهوراً بعد وفاتك. . .

سأتوقف الآن عن هذه التأملات حول المجد بعد الوفاة، وسأعود إلى مناقشتنا التي لم تكتمل حول اللاعكوسية. لنراقب من جديد التطور الزمني لمنظومة معقدة من الجسيمات، مثل ذرات الهليوم في وعاء حجمه لتر، أو مثل جزيئات لتر من الماء. سنستخدم الميكانيك الكلاسيكي لوصف جسيماتنا، وسنفترض أنها تكوّن منظومة معزولة: لا يوجد تفاعل مع العالم الخارجي، ولا يوجد أية طاقة مقدمة إلى أو مأخوذة من منظومتنا. لقد رأى بولتزمان أنه بمرور الوقت ستمر المنظومة بكل التشكيلات الممكنة من وجهة النظر الطاقية، وبقول آخر سيتم تحقيق كل تشكيلات مواضع وسرعات الجسيمات بالطاقة الكلية المناسبة، وسيلاحظ ذلك إذا انتظرنا وقتاً كافياً. في الواقع هناك طريقة أفضل للتعبير عن الأمر وهي القول بأن المنظومة ستعود بدون كلل قريبة بالقدر الذي نريد من كل تشكيل مسموح به طاقياً، وهذا مثال لما دعوناه في فصل سابق **بالعودة الأبدية**. تُعرَف فكرة بولتزمان باسم **الفرضية الإرغودية**؛ وهي تظهر بعض الصعوبات التقنية، ولم نحصل على معالجة رياضية مقنعة إلا بعد موت بولتزمان. الفيزياء مع ذلك واضحة بشكل كاف، وتستحق أن نفهمها.

تتذكر أنه عندما نتكلم عن عدد الحالات في الميكانيك الكمومي، فإنه يجب أن نتكلم عن **حجم فضاء الأطوار** في

الميكانيك الكلاسيكي، ونحن بحاجة إلى هذا التصور الأخير. في مثال لتر الهليوم، تحدد نقطة من فضاء الأطوار مواضع وسرعات كل الذرات الموجودة فيه، لنحصر اهتمامنا بالقسم من فضاء الأطوار المكون من تشكيلات الطاقة الكلية المعطاة (لأن منظومتنا لا تأخذ ولا تعطي طاقة)، بما أن نقطة من فضاء الأطوار تمثل كل المواضع والسرعات لذرات الهليوم تحت البحث، فإن التطور الزمني لهذه المنظومة المعقدة من الذرات هي ببساطة موصوفة بحركة نقطة من فضاء الأطوار.

إننا الآن جاهزون لإعطاء الفحوى الفيزيائي للفرضية الإرغودية: **بتحركها في فضاء الأطوار، فإن النقطة التي تمثل منظومتنا تمر في كل منطقة في جزء من الزمن يتناسب مع حجم تلك المنطقة**[1].

إذا قبلنا هذه الفرضية الإرغودية، يمكننا الآن أن نفهم لماذا عندما يكون لدينا لتران من الماء الدافئ في إناء، لا نرى أبداً السائل ينفصل إلى طبقة من الماء البارد وطبقة من الماء الساخن. في الحقيقة وكما قلنا سابقاً فإن أنطروبية لترين من الماء الدافئ هي أعلى من أنطروبية لتر من الماء البارد زائد لتراً من الماء الساخن. لنفترض أن فرق الأنطروبية هو واحد بالمائة، هذا يجعل اختلافاً واحد بالمائة في طول العدد (كبيراً) الممثل لعدد الحالات. إذن يختلف عدد الحالات أو حجوم فضاء الأطوار بعامل كبير جداً، وهكذا فحجم فضاء الأطوار التابع للترين من الماء الدافئ أكبر بكثير من الحجم التابع للتر من الماء البارد

مضافاً إلى لتر من الماء الساخن. لنلاحظ الآن النقطة الممثلة لمنظومتنا عند تحركها في فضاء الأطوار، فبحسب الفرضية الإرغودية، تقضي هذه النقطة معظم وقتها في المنطقة التابعة للترين من الماء الدافئ، بينما تكون الفترة الزمنية التي تقضيها في منطقة فضاء الأطوار التابعة لطبقة الماء البارد وطبقة من الماء الساخن صغيرة بدرجة مدهشة. وفي الواقع لا نرى أبداً لتري الماء الدافئ ينفصلان إلى لتر من الماء البارد ولتر من الماء الساخن.

أريد أن أكرر الشرح: لقد سكبت بعناية طبقة من الماء الساخن فوق طبقة من الماء البارد، وحصلت بهذه الطريقة على أن تكون منظومتك في منطقة صغيرة خاصة جداً من فضاء الأطوار. ولكن الحرارة تنتشر والطبقات تختلط وبعد بعض الوقت يصبح لديك ماء دافئ بشكل متجانس ممثلاً لمنطقة أكبر بكثير في فضاء الأطوار. إذا انتظرت لوقت طويل كافٍ، فإن العودة الأبدية ستعود بمنظومتك إلى طبقة من الماء البارد وطبقة من الماء الساخن كما في بداية التجربة، ولكن كم من الوقت يجب أن تنتظر؟ يرتبط حساب هذا الزمن بحساب عدد الحالات الذي قمنا به في الفصل 16، والجواب هو من الضخامة لدرجة مخيفة قاسية، فالزمن الذي يجب أن ننتظره هو ببساطة طويل جداً، والحياة جدُ قصيرة لكي نرى مرةً ثانية طبقة من الماء الساخن تعلو طبقة من الماء البارد، وبهذا المعنى فإن خليط الطبقتين هو لاعكوس (لأجل وظيفة الاعتماد الحساس على الشروط الابتدائية، عد للملاحظة[2].

إن تفسير اللاعكوسية الذي حصلنا عليه باتباع بولتزمان، هو بسيط ومتقن في الوقت نفسه، إنه تفسير احتمالي. لا يوجد لاعكوسية في القوانين الأساسية للفيزياء، ولكن الحالة الابتدائية التي اخترناها لمنظومتنا لها خاصية هامة: هذه الحالة الابتدائية هي جِدُ غير محتملة، أعني بذلك أن حجمها النسبي في فضاء الأطوار هو صغير جداً (أو أن أنطروبيتها صغيرة جداً). يقود إذن التطور الزمني إلى منطقة ذات حجم كبير نسبياً (أو إلى أنطروبية كبيرة) والتي تمثل حالة جد ممكنة للمنظومة، ومن حيث المبدأ تعود المنظومة بعد زمن ٍطويلٍ جداً إلى حالتها الأصلية غير المحتملة ولكننا لا نرى أبداً الأمر يحدث. يحب الفيزيائي أن يمثل هذا الوضع بزيادة عدد جسيمات المنظومة إلى اللانهاية بحيث أن زمن العودة الأبدية يمتد إلى اللانهاية أيضاً. في النهاية، لدينا إذن تطور زمني حقيقة لا عكوس.

لقد وصفت تأويل اللاعكوسية المقبول الآن عموماً من قبل الفيزيائيين. هناك بعض الآراء التي تختلف وخاصةً رأي إليا بريغوجين[3]، ولكن الاختلاف يقوم على آراء فلسفية مسبقة أكثر من استناده إلى وقائع فيزيائية ملموسة. إن الآراء المسبقة المختلفة عن العقيدة القائمة، هي آراء ثمينة كما قلنا سابقاً، وضرورية للاكتشاف في الفيزياء. ولكن من الواجب في النهاية التحقق فيما إذا كانت هذه الآراء صحيحة أم خاطئة بالقيام بمقارنةٍ دقيقة بين النظريات والواقع.

أحد مكونات تحليلنا هو لاعكوسية القوانين الأساسية في الفيزياء والتي تظهر كنقطة انطلاقٍ راسخة[4]، ولكن ما هو الحال

بالنسبة للفرضية الإرغودية؟ يجب أن يبرهن عليها رياضياً، وليس لدينا برهان بعد، حتى ولا لنماذج بسيطة، ولكن هذا لا يقلق الفيزيائيين. إن من المتفق عليه أن الكثير من المظاهر الرياضية والفيزيائية لاتزال بحاجة إلى تحديد. على الأغلب نحن بحاجة إلى إضعاف الفرضية الإرغودية، وربما كان من الضروري مواجهة مسائل بعض المنظومات مثل "كأس الدوران" (verres de spin) بطريقة أخرى، مع ذلك فإننا نظن أننا نفهم بشكل عام ماذا يجري.

يمكن أن تهتز هذه الثقة بشكل كبير يوماً ما، ولكنها الآن تقبل دعم فهمنا **للميكانيك الإحصائي** للتوازن. لا يهتم هذا الفرع الأخير من الفيزياء بالمسألة المعقدة لخلط الماء البارد والساخن، ولكن يهتم فقط بمقارنة الماء البارد والساخن، والجليد ببخار الماء. تتوافق توقعات الميكانيك الإحصائي للتوازن مع التجربة تماماً، وها هو فرعٌ من الفيزياء نعرف فيه ماذا نفعل. إن الميكانيك الإحصائي للتوازن هو تقني كفايةً وغني بالتصورات معاً، ولقد انتقلت أفكاره المنتجة إلى الرياضيات وإلى فروع أخرى من الفيزياء حيث تلعب دوراً جوهرياً. بالنسبة لي فإن الميكانيك الإحصائي للتوازن يمثل أعمق وأكمل ما أنتجه العلم، وسأحاول أن أعطي فكرةً مختصرة وسطحية -للضرورة- عن موضوعه في الفصل القادم.

الفصل التاسع عشر

الميكانيك الإحصائي للتوازن

تزور معرضاً للرسم وتتجول بين لوحات الرسم الفرنسية لبدايات القرن العشرين، ترى هنا لوحة فخمة لرينوار، وهناك بدون أي خطأ لوحة لمودلياني، وهناك أيضاً لوحة أزهار لفان كوغ أو لوحة فواكه لسيزان، تلمح من بعيد لوحة لبيكاسو، أو ربما تكون لبراك، ودون شك ترى هذه اللوحات للمرة الأولى ولكنك على الأغلب لا تشك بمن تنتمي إليه. لقد رسم فان كوغ عدداً لا يصدق من اللوحات في السنوات الأخيرة من حياته وجميعها ذات جمالية مدهشة يميزها الإنسان فوراً من لوحات أخرى لغوغان مثلاً، لكن كيف تميزها؟ لم تُستعمَل الألوان بنفس الطريقة، والمواضيع معالجة بطريقة مختلفة، ولكن هناك شيء آخر، من الصعب التعبير عنه والذي مع ذلك تلتقطه فوراً، شيء ما يتعلق باختيار الأشكال وتوازن الألوان.

نفس الشيء إذا فتحت المذياع، فإنك تعرف فوراً ما إذا كان ما تسمعه هو موسيقى كلاسيكية أو موسيقى البيتلز. وإذا كانت الموسيقى الكلاسيكية لاتهمك بشيء، فإنك مع ذلك تميز باخ عن موسيقى القرن XVI، وتميز بيتهوفن من باخ. ربما كانت مقطوعات لم

تسمعها مطلقاً، ولكن هناك شيء فريد في توزيع الأصوات يسمح بالتعرف تقريباً فوراً على اللحن. يمكن التمرن على التعرف على "هذا الشيء الفريد" بدراسات إحصائية[1]، يمكن خاصةً دراسة الفواصل بين العلامات الموسيقية المتتالية، الفواصل الموسيقية القصيرة شائعة بشكل خاص، ولكنها أكثر شيوعاً في الموسيقى القديمة. تستخدم الموسيقى المعاصرة كل أنواع الفواصل. بتقدير تواتر الفواصل بين علامات متتالية في عمل موسيقي، يمكن تقرير فيما إذا كان العمل هو لبوكستهود، أو لموتزارت، أو لشونبيرغ. ويمكن الوصول بالتأكيد إلى نفس النتيجة بطريقة أفضل وأسرع بسماع بعض الأوزان mésure، ولكن هذا في الواقع ليس إلا استخداماً لنفس الطريقة. إن المنظومة (الأذن - الدماغ) هي منظومة تحليلٍ إحصائي مدهشة، تسمح لنا بأن نقول: هذه موسيقى فيردي، أو برامز، أو ديبوسي.

ما أزعمه هو أننا نبني تعرفنا على رسام أو موسيقي على معايير إحصائية، وقد تعتبر ذلك غير معقول: كيف يمكن أن نكون واثقين بالتعرف إذا أسسناه على احتمالات؟ الجواب هو أننا ربما نكون شبه واثقين بنفس الطريقة التي نكون فيها شبه واثقين من جنس الشخص الذي نقابله في الطريق: الرجال هم عادةً أكبر، ذوي شعر قصير وأغمق، وأرجل أطول الخ. إذا أخذنا أية صفة لوحدها فإنها غير كافية، ولكننا نتعرف على عددٍ من الصفات في أجزاء الثانية، والمجموع لا يترك على الأغلب مجالاً معقولاً للشك.

مع ذلك بقي سؤال: كيف يمكن لفنان ما أن ينتج بطريقة متكررة أعمالاً لها نفس مجموعة الصفات الاحتمالية، مجموعة تميز

ذلك الفنان بصورة خاصة؟ أو لنأخذ مثالاً آخر: كيف يمكن لكتابتك أن تكون مميزةً بهذا الشكل، لدرجة صعوبة تقليدها من قبل الآخرين، وأن تخفى من قبلك؟ لا نعُرف الأجوبة على هذه الأسئلة لأننا لا نعرف كيف يعمل الدماغ، ولكننا نفهم شيئاً مماثلاً؛ حقيقة أساسية تكوّن بطريقةٍ ما حجر الزاوية للميكانيك الإحصائي للتوازن.

وهاك هذه الحقيقة الأساسية: **إذا فرضنا شرطاً شاملاً بسيطاً على منظومة معقدة، فإن التشكيلات التي تحقق هذا الشرط الشامل لها عادةً مجموعة من الصفات الاحتمالية التي تميز هذه التشكيلات وبطريقة فريدة.** إذا أعدت قراءة هذه العبارة فإنك سترى أنها غامضة وميتافيزيقية بصورةٍ مقصودة بشكلٍ يجعلها قابلةً للتطبيق على الرسم أو الموسيقى. وحقيقة أن عملاً ما هو لفنانٍ معين ما هو إلا "الشرط الشامل البسيط"، و"مجموعة الصفات الاحتمالية" للعمل هي ما يسمح لنا بالتعرف على الفنان. لنناقش الآن حالة الميكانيك الإحصائي للتوازن. نموذجياً، المنظومة المعقدة هنا هي منظومة مشكّلة من عدد كبير من الجسيمات في وعاء (لتر من الهليوم هو مثالنا المعتاد)، والشرط الشامل البسيط هو أن الطاقة الإجمالية للمنظومة لها على الأكثر قيمة مُعينة (E). نحن إذن نحدد الحالة الكبرية (الماكروية) للمنظومة، وهذا كما يُزعم سيحدد تركيبها الاحتمالي الصغري (الميكروي).

سأستسلم ثانيةً للرغبة في كتابة معادلة؛ وهاك العلاقة التي تعطي الطاقة لمنظومة جسيمات نعرف سرعاتها v_i ومواضعها x_i:

$$\text{الطاقة} = \sum_i \frac{1}{2} m v_i^2 + \sum_{i<j} V\left(x_j - x_i\right)$$

وكما رأينا سابقا $\frac{1}{2}mv_i^2$ هي الطاقة الحركية للجسيم رقم i. الحد $V(x_j\text{-}x_i)$ هو الطاقة الكامنة للتفاعل بين الجسيم i والجسيم j، ونفترض أن الطاقة الكامنة لا تعتمد إلا على المسافة مابين الجسيمين وتتناهى بسرعة إلى الصفر عندما تصبح المسافة كبيرة. شرطنا الشامل البسيط هنا هو:

الطاقة ≥ E

يُزعم أنه إذا كان تشكيل معين من المواضع X_i والسرعات V_i يحقق الشرط السابق، فإن لهذا التشكيل عادةً صفات خاصة تسمح بتمييزه من بين تشكيلاتٍ تقابل خيارات أخرى للطاقة الكامنة V أو لـ E؛ أمرٌ لا يصدق، أليس كذلك؟ في الحقيقة كان يلزمنا بعض الوقت حتى نرى الأمور بوضوح كاف، ويعود الفضل في فهمنا للوضع إلى جيبس وإلى الفيزيائيين اللذين تبعوه. تفاصيل التحليل هي نسبياً صعبة وتقنية، ولا يمكن تقديمها هنا، ولكن هناك فكرة مركزية بسيطة وأنيقة معاً، وأريد أن أشرحها هنا.

و لكني أرى أنه لديك اعتراض، وعلي أن أواجهه فوراً. إذا كان لدينا تشكيلاً تحقِق طاقته العلاقة:

الطاقة ≥ E

فإنها تحقق أيضاً:

الطاقة ≥ `E

لأجل `E أكبر من E.إذن لا يمكن تمييز التشكيلات configuration الموافقة E عن تلك الموافقة `E، على عكس ما أدعيته، ولم يبق إلا أن أترك الإثبات الذي قمت به.

ما ينقذ إثباتي هو الحال "عادةً" *habituellement*؛ يوجد تشكيلات بطاقة ≤ `E أكثر بكثير جداً من التشكيلات التي لها طاقة≤ E. إذن عادةً لا يمكن لتشكيلٍ ذي طاقة ≤ `E أن تكون له طاقة ≤ E، ولا يمكن أن يختلط بتشكيلات من طاقة منخفضة. وبقولٍ أكثر تقنية، إن الأنطروبية المتعلقة بـ `E هي أكبر من تلك المتعلقة بـ E، والحجم الموافق في فضاء الأطوار (أو عدد الحالات) هو أكبر بكثير.

بمعنىً ما، لقد قمت بإعطائك الفكرة المركزية والأنيقة التي وعدتك بها، وسأقوم الآن بتقديم تلك الفكرة من جديد بمعالجة مثالٍ بسيطٍ جداً وواضح. سأفترض أن الطاقة الكامنة V هي صفر، بحيث أن شرطنا الشامل للطاقة هو الآن:

$$\sum_{i=1}^{N} V_i^2 \leq \frac{2E}{m}$$

لتبسيط الأمور أكثر ما يمكن، سأفترض أن جزيئاتنا الـ N موجودةً في صندوق ذي بعد واحد، بحيث أن Vi هي أعداد بدلاً من أشعة، وسأكتب: $2E`m = R^2$، وسيصبح الشرط آنذاك:

$$\sum_{i=1}^{N} V_i^2 \leq R^2$$

وهذا يعني أن الشعاع ذو الـ N بعد والمشكّل من المركبات V_i له طويلة$\geq R$؛ (هذا ينتج عن نظرية فيثاغورس). وبقولٍ آخر فإن تشكيلات السرعات المسموح بها هي النقاط الداخلية لكرة نصف قطرها R، وذات أبعاد N. ما هي نسبة التشكيلات التي تقع داخل

كرة نصف قطرها $\frac{1}{2}R$؟ إنها نسبة حجمي الكرتين: 1/2 إذا كانت N=1، و1/4 إذا كانت N=2، و1/8 إذا كانت N=3 و1/1024 إذا كانت N= 10، ، أقل من جزء من المليون إذا كانت N =20 الخ. إذا كان هنالك الكثير من الجسيمات، أي إذا كانت N كبيرة، ستكون عملياً كل التشكيلات خارج الكرة التي نصف قطرها R ½ بل وستكون خارج الكرات ذوات نصف القطر: $\frac{9}{10}R$ أو $\frac{99}{100}R$.

تتلخص نتيجة المناقشة السابقة بالتالي: لنعتبر كرة نصف قطرها R وبأبعاد N، عندما تكون N كبيرة حينذاك تكون معظم النقاط التي داخل الكرة في الواقع قريبة من السطح، (هناك بالطبع شواذ: بالطبع مركز الكرة ليس قريباً من السطح). لدينا إذن هنا مثالٌ حيث يقتضي شرطٌ عامٌ بسيط (كأن تكون نقطة ضمن كرة) - عادة - شرطاً أكثر تحديداً (أن تكون النقطة قريبةً من سطح الكرة). هذا موقفٌ عامٌ جداً، ولكن لأجله يجب أن ندفع ثمناً ما: هو إدخال الظرف *عادةً* بدلاً من *دائماً*. بالإضافة إلى ذلك لقد افترضنا N كبيرة: إننا نهتم بهندسة ذات عدد أبعاد كبير (أو بمنظومة معقدة مشكلة من عدد كبير من الجزيئات).

يتضمن جزءٌ كبير من أعمال الباحثين العلميين متابعة فكرةٍ عامة (مثل الفكرة الميتافيزيقية عن المنظومات المعقدة التي شكلناها في الأعلى)، ورؤية إلى أي حد هي قابلة للتطبيق وبدءاً من أين تصبح غير قابلةٍ للاستخدام ولا قيمة لها. في الواقع يتطلب هذا النوع من

التحليل الكثير من الوقت والجهد. ومع أنه من غير الممكن هنا إعطاء فكرةٍ عن هذا التحليل[2]، فإنني أؤكد أنه لا غنى عنه، ويشكل أساساً ضرورياً للنقاش اللاتقني الذي نقدمه هنا. متابعة النقاش على المستوى الميتافيزيقي والأدبي الصرف هو كقيادة سيارة مُغمضين الأعين: هذا لا يمكن أن يقود إلا إلى الكارثة. أما وقد أرضيت ضميري بهذا التحذير، فإنه يمكنني الآن الحديث أكثر عن الميكانيك الإحصائي للتوازن. وحيث أنني سأكون أكثر تقنية لذا يمكنك الاختيار بين أن تقرأ بطريقة بطيئة ومتمعّنة نهاية الفصل، أو أن تسرع منتقلاً إلى الفصل التالي.

كما رأينا تتزايد الأنطروبية S (وليكن بمقدار ΔS)، عندما تتزايد الطاقة E (لنقل بمقدار ΔE). إن نسبة ($\Delta S/\Delta E$) (أي مشتق الطاقة بالنسبة للأنطروبية) هي كمية مهمة جداً، لندعوها T. لنفرض أنه لدينا الآن منظومة مكونة من جزئين I وII (هذان الجزءان هما منظومتان ماديتان متوازنتان en équilibre إحداهما مع الأخرى). لنفرض الشرط:

$$E \geq \text{الطاقة}$$

هذا يتضمن كما رأينا سابقاً أن الطاقة عادةً مساوية لـ E تقريباً. ولكن هنالك نتائج أخرى أيضاً: إن طاقة الجزء I من المنظومة هي تقريباً ثابتة عند قيمة ولتكن E_I ، وطاقة الجزء II هي أيضاً ثابتة عند قيمة ولتكن E_{II}. كيف تختار المنظومة E_I ، E_{II} ؟ تحاول المنظومة أن

تجعل مجموع أنطروبية المنظومة I (ذات الطاقة E_1) وأنطروبية المنظومة II (ذات الطاقة E_{11}) أعظمياً، مع احترام الشرط $E_I+E_{II}\approx E$. إذا تمعنت في ذلك وجدته معقولاً: تشغل المنظومة في فضاء الأطوار حجماً أكبر ما يمكن مع احترام شرط أن الطاقة ثابتة، يُعبر رياضياً عن واقع أن مجموع أنطروبية I وII هو أعظمي بالشرط أن T الخاصة بـ I هي مساوية لـ T الخاصة بـII (الملاحظة 3):

$$T_I = T_{II}$$

وهكذا تظهر بشكلٍ طبيعي فكرةُ درجة الحرارة: بتقريب عامل اصطلاحي، يمكن مطابقة T مع درجة الحرارة المطلقة:

$$\text{درجة الحرارة المطلقة} = \frac{1}{K}\frac{\Delta E}{\Delta S}$$

حيث K هو ثابت بولتزمان. تكون المنظومتان الجزئيتان بوضع توازن إذا كانتا في درجة حرارة واحدة، لنلاحظ أننا حتى الآن لم ندخل مفهوم درجة الحرارة، حتى وإن تكلمنا عن ماءٍ بارد وماءٍ حار للإشارة إلى أن الطاقة الكلية هي أعلى أو أخفض. وبدلاً من البدء بتحليل التجارب، فإننا انطلقنا من اعتباراتٍ عامة عن الهندسة ذات الأبعاد الكثيرة، ووصلنا إلى كمية لا يمكن إلا أن تكون درجة الحرارة. لقد حاول مؤسسو الميكانيك الإحصائي بعدد أصغري من الفرضيات الإضافية رؤية كيف يمكن أن يبدو عالمٌ مكون من عدد كبير من الذرات والجزيئات. تصوّر دهشتهم عندما رأوا أن هذا العالم الذي كونوه مشابه للعالم الذي نعيش فيه.

الفصل العشرون

الماء المغلي وأبواب جهنم

إذا لم تكن تفهم اللغة الروسية فإن كل الكتب في تلك اللغة تظهر لك متشابهة. نفس الشيء بالنسبة للكتب العلمية، إلاّ إذا كنت قد درست الفيزياء النظرية فإنك لن ترى أي فرق بين مختلف مجالات هذا العلم: في كل الحالات ستتعامل مع نصوصٍ عويصة ممزوجة بأحرف يونانية، وبعلاقات ورموز تقنية، ومع ذلك فإن لكل مجال من الفيزياء طابعه الخاص.لنأخذ مثلاً النسبية الخاصة، إنه موضوع جميل، ولكن لم يعد فيه أي غموض بالنسبة لنا؛ نظن أننا نعرف في هذا المجال كل ما يمكن لنا أن نرغب بمعرفته. على العكس، يحتفظ الميكانيك الإحصائي بأسراره السوداء: وكل شيء يشير إلى أننا لا نفهم إلا جزءاً صغيراً مما يجب فهمه. ما هي إذن الأسرار السوداء للميكانيك الإحصائي؟ سنتفحص في هذا الفصل اثنين أو ثلاثة من هذه الأسرار.

غليان الماء عندما نسخنه هو ظاهرة مدهشة، وتجمده عند تبريده هو أيضاً غامض. عندما نخفض درجة حرارة لتر من الماء، من المعقول

أن نتوقع أن يصبح أكثر لزوجة، وأكثر "سماكة"، كما يمكن أن نتصور أنه في درجة حرارة منخفضة كفاية سيصبح السائل لزجاً، سميكاً وحتى أن يصبح صلباً وأن يتصرف كصلب. هذه الأفكار الطبيعية عن تصلب الماء هي أفكار باطلة[1]، ما نلاحظه عند تبريد الماء هو أنه في درجة حرارة معينة ينقلب إلى جليد بطريقة فجائية. وبالمثل، عندما نسخن الماء إلى درجة حرارة معينة فإنه يبدأ بالغليان، أي أنه يحدث انتقال متقطع إلى بخار. تجمد وغليان الماء هما مثالان معروفان *لتغيرات الطور* ***changements de phase***، وهاتان الظاهرتان هما من الاعتياد بحيث أننا نفقد الإحساس بغرابتهما الشديدة، وبحاجتهما إلى الشرح. ربما يمكن القول أن الفيزيائي هو الشخص بيننا الذي لا يعتبر أن الماء يجب أن يتجمد أو يغلي عندما نرفع أو نخفض الحرارة، لكن ماذا يقول لنا الميكانيك الإحصائي عن تغيرات الطور؟

متتبعين فلسفتنا العامة بفرض شرطٍ شاملٍ بسيط (هو هنا تثبيت الحرارة)، نحصل على أن تكون كل أنواع مواصفات المنظومة (عادةً) معينة بطريقة وحيدة. إذا أُعطيتَ صورةً لتشكيل الذرات في لحظة ما للهليوم في درجة حرارة 20 س، يجب أن تكون قادراً على تمييزها من صورة مقابلة في درجة حرارة أخرى أو لمادة أخرى، كما تميز لوحة لفان كوغ من أخرى لغوغان بلمحة. تتغير "**مجموعة الصفات الاحتمالية**" التي توصف ترتيب ذرات مادة كالهليوم مع الحرارة،

وعادةً ما يتم التغير تدريجياً، والشيء نفسه نراه غالباً، فالرسام يغير أسلوبه تدريجياً عندما يهرم، ثم يحدث ما هو غير متوقع: في درجة حرارةٍ معينة، بدلاً من التغير التدريجي تحدث قفزةٌ مفاجئة:من الهليوم الغازي إلى الهليوم السائل، أو من الماء إلى البخار أو إلى الجليد.

هل من الممكن التعرف بسهولة على الجليد وتميّزه من الماء السائل برؤية صورةٍ تمثل مواقع الجزيئات في لحظةٍ معينة؟ نعم، الجليد متبلور (فكر في بلورات ندفة ثلجية)، واتجاهات محاور البلورة واضحة في الصورة كتراصفٍ إحصائي للجزيئات في اتجاهات معينة، بينما العكس في الماء السائل، إذ لا توجد اتجاهات مفضلة.

ها هي إذن مسألة جميلة بالنسبة للفيزيائيين النظريين: مسألة برهان أنه إذا ما رفعنا أو خفضنا الحرارة فستحدث تغيرات في الطور معطيةً البخار أو الجليد، مسألةٌ جميلةٌ حقاً... ولكنها صعبة للغاية! نحن بعيدون للغاية عن إمكانية تقديم البرهان المطلوب. في الحقيقة لايوجد نوع وحيد من الذرات أو الجزيئات التي يمكن لأجلها البرهان على أن هناك تبلور في درجات حرارة منخفضة، وتبقى مثل هذه مسائل صعبة للغاية بالنسبة لنا.

في الحقيقة ليس من النادر في الفيزياء أن نجد أنفسنا في مواجهة مسألةٍ صعبةٍ للغاية على أن نستطيع حلها... .يوجد بالتأكيد دوماً طريقة للخروج من هذا المأزق، ولكن لأجل ذلك يجب أن نغير في علاقة النظرية مع الواقع بطريقة أو بأخرى، إما بأن تعتبر مسألة

رياضية مشابهة لتلك التي لا تستطيع حلها، ولكنها أسهل، وتفقد أقل أو أكثر علاقتك بالواقع الفيزيائي، أو أن تحتفظ قدر المستطاع باتصالك بالواقع الفيزيائي، ولكنك تغير في تمثيله (غالباً بالتضحية بالدقة الرياضية أو الاتساق المنطقي). لقد أُستخدمت المقاربتان لمحاولة فهم تغيرات الطور، وقد كانت كلتاهما منتجتين. من جانبٍ يمكننا تحليل منظومات *على شبكة* (*sur un réseau*) حيث لا يمكن للذرات أن تتواجد إلا في مواقع محددة بدلاً من التحرك بحرية، وبالنسبة لهذه المنظومات يمكن البرهنة رياضياً على وجود نوع من التغيرات في الطور[2]، ومن جانبٍ آخر يمكننا حقن أفكار جديدة في تمثيل الواقع، مثل أفكار ويلسون حول لاتغير المقياس l'invariance dèchelle والحصول على محصول غني من النتائج الجديدة[3]. لكن بالرغم من كل شيء ليست النتائج مرضية تماماً. نحب أن نفهم الظاهرة العامة لتغيرات الطور، وللأسف فإن نظرةً تصورية للموضوع تُفلت منا ثانية حتى الآن .

ولإظهار قوة أفكار الميكانيك الإحصائي، سأقفز الآن من مسألة غليان وتجمد الماء إلى موضوعٍ مختلفٍ تماماً : الثقوب السوداء.

إذا أطلقت طلقة نارية في الهواء فإن الطلقة ستسقط على الأرض بعد وقت ما لأن سرعتها لم تكن كافيةً لتتغلب على الجاذبية، أي لجذب الأرض للطلقة، ولكن طلقةً سريعة جداً، تتجاوز سرعتها *سرعة الانفلات* (*vitesse de libération*) ستغادر الأرض للأبد؛ إذا أمكننا إهمال بعض التفاصيل الصغيرة مثل التباطؤ الناتج عن

احتكاك الهواء. لبعض الأجرام السماوية سرعات انفلاتٍ أقل مما هي للأرض، ولبعضها سرعاتٌ أكبر. تخيّل نجماً صغيراً جداً ذو كتلة كبيرة جداً بحيث أن سرعة الانفلات منه هي أكبر من سرعة الضوء، عند ذاك كل ما تقذفه في الهواء، حتى ولو كان شعاعاً ضوئياً سيقع ثانيةً، ولن يمكنك إذن إرسال أية رسالة إلى العالم الخارجي، وعندها تكون قد وقعت في الفخ. يُدعى هذا النوع من الأجرام السماوية ثقباً أسود، ويجب أن يشار إليه لتنبيه السائح غير الحذر بنفس عبارة التحذير التي -إذا صدقنا دانته- كُتِبت فوق أبواب الجحيم: (Lasciate ogni speranza, voi ch`entrate) *دع ايَّ املٍ بالخروج، انت ايها الداخل....*

لتسامحوني على هذا الوصف الساذج نوعاً ما للثقوب السوداء: الأضواء الحمراء تومض وصفارات الإنذار تزعق في فكر الفيزيائي عندما يتعلق الأمر "بسرعة تتجاوز سرعة الضوء". عندما نريد التكلم عن الجاذبية وسرعة الضوء معاً، فالنظرية الفيزيائية التي يجب توظيفها هي: النسبية العامة. تسمح نظرية النسبية العامة لإنشتاين بوجود الثقوب السوداء، ويمكن لهذه الأخيرة أن تكون في حالة دوران. تتشكل الثقوب السوداء عندما تتوضع كمية كبيرة من المادة في حيزٍ من الفراغ صغيرٍ لدرجة كافية؛ إنها تجذب وتبتلع كل ما يوجد في جوارها. ليس لدى فيزيائيي الفلك حتى الآن برهانٌ مطلق على وجود الثقوب السوداء، ولكنهم يظنون أنهم رأوا بعضها، خاصةً مصادر الإشعاعات القوية جداً في مركز بعض المجرات، وكذلك فإن

الكازارات objets quasi stellaires ربما كانت على الأغلب مترافقة مع ثقوب سوداء ذات كتلة ضخمة. لا ينطلق الشعاع من الثقب الأسود نفسه، الذي بالأساس لا يمكنه أن يطلق أي شعاع، ولكن من المناطق المجاورة، هذه المناطق إذا صدقنا الفيزيائيين الفلكين، هي أماكن غير سارة وغير صحيّة كأبواب الجحيم. في الحقيقة إذا اختير فيزيائي كمصممٍ للجحيم، فإن التصميم سيشبه بدون شك ثقباً أسود ذا كتلة ضخمة. لنفترض أن ثقباً أسود دوّار تشكّل من اندماج E9 كتلة شمسية (مليار)، سيكون الثقب الأسود محاطاً بقرص تزايدي (*disque d'accretion*) من مادة ممتصة من الثقب الأسود تسقط عليه بشكل حلزوني، تكون مادة قرص التزايد في درجة حرارة عالية ومؤينة مشكلةً البلاسما التي عادة ما يتعلق بها حقل مغناطيسي. يمكن محاولة تحليل ديناميك المادة الساقطة نحو الثقب الأسود، والحقول المغناطيسية والكهربائية، والتيارات الكهربائية الخ، إلا أن النتائج المحصلّة تتجاوز كل تخيل. يتشكل فرق كمون من شدة E20 (عشرون صفراً) قرب الثقب الأسود، وتتسارع الإلكترونات بسبب هذا الفرق في الكمون وتصطدم بالفوتونات (الجسيمات التي تكّون الضوء)، وتقابل هذه الفوتونات المسرعة فوتونات أخرى وتشكل زوجاً إلكترون - بوزيترون، مكونةً حول الثقب جواً جحيمياً؛ هذه على الأقل إحدى النظريات حول ما يحدث هناك، فالفيزيائيون الفلكيون ليسوا متفقين على التفاصيل. ولكن من المنظور العام يمكننا القول

أنه لدينا منطقة تعادل مجموعتنا الشمسية تصدر كمية هائلة من الطاقة على شكل إشعاع. نعرف أن الطاقة والمادة هما متعادلتان من خلال علاقة إنشتاين الشهيرة $E=mc^2$، وكمية الطاقة المنتَجة في الحالة التي نهتم بها هي من مقياس 10 مرات كتلة الشمس في السنة، وهي كمية فظيعة من أي زاوية نظرنا منها.

و لكن الفيزيائيين النظريين لا يتأثرون بسهولة، ويتابعون طرح الأسئلة من مثل السؤال التالي: لنفترض أنه بدلاً من قرص التزايد المشكل من المادة المنهارة نحو الثقب الأسود لدينا فراغ مطلق، ماذا نرى من ثقب أسود وحيد في الفراغ؟ هل يصدر أية أشعة؟ حسب الأفكار الكلاسيكية للنسبية العامة سيكون هناك تأثيراتٌ جاذبية، تجذب المادة وتجعلها تدور أيضاً في حالة ثقب أسود دوّار، ويمكن أن يكون هناك أيضاً شحنة كهربائية، ولكن للتبسيط سوف لن نهتم بها، وغير ذلك ستتشابه الثقوب السوداء كثيراً. لايمكن تمييز ثقبين أسودين لهما نفس الكتلة ونفس الدوران (أي لهما نفس العزم الزاوي)، ليس مهماً أن يكون الثقب الأسود مكوناً من الهيدروجين أو من الذهب، فقد نسي الثقب أصوله (إلا الكتلة والعزم الزاوي)، وسيرفض الفيزيائي الحديث عن ثقبٍ أسود من الهيدروجين أو من الذهب. بالإضافة إلى ذلك وبحسب نظرية النسبية العامة لا يصدر الثقب الأسود أي إشعاع.

لقد كان البريطاني ستيفان هوكينغ Stephen Hawking أحد فيزيائي الفلك الذين اهتموا بمسألة الثقوب السوداء، ولم يعلن أنه قانع

من الجواب المتعلق بغياب الإشعاع. إن قرار النسبية العامة واضح، ولكنه لا يأخذ بالاعتبار الميكانيك الكمومي، (في الواقع ليس لدينا حتى الآن نظرية متسقة تماماً من الوجهة المنطقية توّحد الكم مع النسبية العامة). في أي شيء يمكن للميكانيك الكمومي أن يكون هاماً في هذه المسألة؟ أي نعم إنه مهم، لأن ما ندعوه الفراغ في الميكانيك الكمومي لا يمكن أن يكون أبداً فراغاً تاماً: إذا راقبت منطقة صغيرة من الفراغ، حيث "الموضع" معروفٌ ومحددٌ بدقة، وحسب علاقة الارتياب لهايزنبرغ يجب أن تكون "السرعة" (أو بدقةٍ أكثر الاندفاع impulsion) غير محددة، هذا يعني أن هناك *تأرجات الخلاء الكمومية** *(fluctuation du vide)* على شكل جسيمات تتحرك

---

*تعبر التأرجحات الكمومية في الفيزياء الكوانتية عن التغير المؤقت في مقدار الطاقة في نقطة من الخلاء، والتي تنتج عن مبدأ الارتياب لهايزنبرغ، والذي بحسبه لدينا العلاقة بين الطاقة والزمن:

$$\Delta e \Delta t \approx \frac{h}{2\pi}$$

والنتيجة هي أن عدد الجسيمات الموجودة في نقطة من الخلاء غير محدد تماماً لذلك يتم تمثيله بتوزيع احتمالي، هذا يعني أن هنالك في كل لحظة خلق أزواج من الجسيمات وانعدام جسيمات أخرى، وبما أن هذه الجسيمات ليست دائمة الوجود بل مؤقتة نسميها بالجسيمات الوهمية virtual particles أو التأرجحات الكمومية quantum fluctuation. يبدو أثر هذه التأرجحات الكمومية او الجزيئات الوهمية في "أثر كازيمير" Casimir Effect، وتتلخص هذه الظاهرة بتجاذب لوحين معدنين غير مشحونين موضوعين في الخلاء، وينتج هذا التجاذب عن أن عدد الجزيئات الوهمية بين اللوحين أقل منه خارجهما مما سيؤدي زيادة الضغط خارج اللوحين عن الضغط داخلهما مما يؤدي إلى تجاذبهما. - المترجم -

بسرعاتٍ كبيرة[4]. تظهر هذه المناقشة - أعترف بذلك- وكأنها تلاعبٌ بالكلمات، ولكنها الطريقة الفضلى للتعبير بالكلمات عن ما تعبر عنه الشكلانية الرياضية formalisme mathématique بطريقة أكثر اتساقاً cohérent. عادةً، لا يؤبه لتأرجحات الخلاء الكمومية إذا لم تكن المنطقة من الخلاء التي نراقبها صغيرة جداً، ولكن كيف ستكون عليه هذه التأرجحات الكمومية بالنسبة للخلاء الخاضع لحقل الجاذبية الشديد الذي يسود قرب ثقبٍ أسود؟ هذا هو السؤال الذي افترضه هوكينغ، وتبعاً لحساباته تقع بعض الجسيمات المكونة لتأرجحات الخلاء الكمومية داخل الثقب، بينما تتفلت أخرى على شكل إشعاعات. في الواقع يصدر الثقب الأسود إشعاعاً كهرطيسياً (إذن ضوئياً) تماماً كما يصدر أي جسمٍ عندما يسخن، وبالتالي يمكننا الحديث عن الحرارة لثقبٍ الأسود.

لقد تقبل الفيزيائيون نتائج هوكينغ بكثيرٍ من الشك، ولكنها تأكدت بحساباتٍ مستقلة، وهي الآن مقبولة بشكلٍ جيد[5]. ربما كان من الواجب القول فوراً أن الثقوب السوداء ذوات الكتلة الكبيرة لها حرارة هوكينغ منخفضة جداً، وأنه لا يمكننا التقاط الشعاع الموافق. لهذا الشعاع مع ذلك أهمية نظرية كبيرة، وسأعطي الآن فكرة عنها.

يؤكد القانون الثاني للترموديناميك، كما رأينا، أن لا يمكن للأنطروبية أن تنقص أبداً. سيظهر أنه يمكن معاندة هذا القانون برمي أشياء ذات أنطروبية كبيرة في ثقبٍ أسود (سيكون هنالك زيادة في

كتلة الثقب، ولكن سينسى هذا الأخير ما رميناه). ومع ذلك فإنه يمكننا إنقاذ القانون الثاني للترموديناميك بإعطاء الثقب الأسود أنطروبية (تعتمد على كتلته وعلى عزمه الزاوي). يمكن إنتاج ثقب أسود بطرق كثيرة مختلفة (من الهيدروجين، من الذهب الخ)، وعدد أرقام عدد تواريخه الماضية الممكنة هي تعريف طبيعي لأنطروبيته. بطريقةٍ أكثر رياضية، يمكننا كتابة:

الأنطروبية = ك× لغ (عدد التواريخ الممكنة للثقب)

وهكذا يمكن تكوين نظرية متسقة لترموديناميك الثقب الأسود الذي ننسب له خاصةً درجة حرارةٍ معينة تماماً، ولكن حينذاك وكأي جسم في تلك الحرارة يجب على هذا الثقب الأسود أن يصدر إشعاعاً كهرطيسياً (إذن ضوئياً): نعم إنه يصدر منه كما بّين ذلك هوكينغ. وهكذا تتضوي الثقوب السوداء تماماً في إطار الترموديناميك والميكانيك الإحصائي، وهذه إحدى المعجزات التي تحدث أحياناً في العلم، والتي تُظهِر لنا أن هناك في القوانين الفيزيائية اتساقٌ أكبر مما نجرؤ على تصوره.

الفصل الواحد والعشرون

المعلومــات

مغموسةٌ بدمك ذاته، تصِر الريشة على الرَق، لقد وقعت عهداً مع الشيطان، لقد وعدته بروحك بعد الموت، إذا أعطاك خلال الحياة الثروة وكل ما تستطيع الثروة أن تشتريه. كيف للشيطان أن يطبق التزامه؟ يمكنه أن يعطيك إحداثيات كنز مخبأ، ولكن هذا لم يعد من الموضة. بطريقة أكثر عملية، يمكنه أن يخبرك مسبقاً بنتائج سباقات الخيل، مما يسمح لك بالحصول على بعض الرخاء، وإذا كنت أكثر تطلباً، ربما يعطيك مسبقاً تحولات البورصة. ***المعرفة*** هي ما يقدمه لك الشيطان. في كل الحالات ما تستلمه كثمنٍ لروحك هو المعرفة أو المعلومات: إحداثيات الكنز، أسماء الخيول الفائزة، أو قائمة قيم الأسهم، بفضل هذه المعلومات تصبح غنياً ومحبوباً ومحترماً.

وهاك مثالٌ آخر لقوة المعلومات. لنفترض أن كائنات من خارج الأرض ذوي أهداف سيئة يريدون إزالة الجنس البشري من على وجه الأرض دون المساس بالبيئة، يمكنهم أن يفعلوا باستعمال فيروس مناسب، فيبحثون إذن عن فيروس مميت كفيروس السيدا، ولكنه

سهل العدوى، وسريع الفعالية، كنوع جديد من فيروسات الرشح، يبحثون عن سلاح لا يدع لنا وقتاً لتحضير لقاحات ولا لتنظيم دفاع.

نأمل أن لا يوجد الفيروس القادر على إزالة الإنسانية الآن على كوكبنا، ولكنه يمكن أن يُنتَج بوسائل تقنية مناسبة. ما يلزم الكائنات اللاأرضية، ذوي الأهداف السيئة هو وصفٌ دقيق للفيروس: ثانية من المعلومات، وفي حالة السيدا فإن المعلومات الضرورية هي بشكلٍ أساسي محتواة في سلسلة القواعد التي تُرّمز المعلومات الوراثية للفيروس. هذه السلسلة هي رسالة مكتوبة بأبجدية مكونة من أربعة أحرف (A,T,G,C)[1]، وتحتوي الرسالة على 9749 حرفاً أو ما يقارب ذلك، وهي رسالةٌ قصيرةٌ كفاية. يوجد دون شك رسالة من طول مشابه تَرمُز لفيروس مميت وسريع وقوي العدوى وقادر على أن يهلكنا جميعاً، هذه هي الرسالة التي يمكن أن تعني نهاية البشرية، يمكن أن تطبع على بعض صفحات كتاب كالذي بين يديك.

شخصياً، لا يزعجني كثيراً وجود كائناتٍ من خارج الأرض ذوي نياتٍ سيئة، فرؤساء الدول الهاذون، والحكومات المتعصبة تخيفني أكثر. إنهم سيجدون دون صعوبة علميين ذوي رؤىً ملتبسة أو تقنيين مثابرين ودون خيال، للعمل في المشاريع الأكثر هذياناً والأكثر انتحارية، وربما هكذا سينتهي تاريخ البشرية.

الفكرة الوحيدة المواسية التي تحضرني حول هذا الموضوع هي الآتية: إذا كان للكائنات اللاأرضية أو العلميين الذين فقدوا الاتجاه

أن يعتمدوا على المصادفة لإيجاد الفيروس النهائي، حينذاك ليس لنا في الحقيقة أن نخاف من شيء. إن عدد الرسائل المكونة من عشرة آلاف حرف مكتوبة بأبجدية من أربعة أحرف هي أكبر بكثير من عدد حبات الرمل في كل شواطئ مجرتنا، أكبر من عدد كل ذرات العالم المعروف، لا يمكن تصوّرُ مقدارٍ كبيرٍ بهذا العدد، باختصار لا يمكن لأحدٍ أن يأمل بتخمين رسالةٍ من عشرة آلاف حرف تماماً.

يعطي طول رسالة معينة فكرةً عن كمية المعلومات التي تحتويها. طول السلسلة مهم، ولكن يجب الأخذ في الاعتبار اختيار الأبجدية: يمكن أن نبدل الأحرف الأربعة A,T,G,C بالأرقام 0 و1، إذا ترجمنا رسالة بواسطة رقمين: A=00, T=01 G=10, C=11 فإن طول الرسالة المترجمة هو ضعف طول الرسالة الأصلية، بالرغم من أن كمية المعلومات في الاثنتين هي ذاتها. يمكن أيضاً ترميز كل زوج متتال من الحروف A,T,G,C بستة عشر حرفاً من الأبجدية a,b,c, ...p. مما يعطينا رسالة طولها النصف، ولكنها تحوي دوماً ذات كمية المعلومات.

إذا أُعطيت نصاً بالإنكليزية يمكنك ضغطه بحذف الأحرف الصوتية، ويبقى النص عادة مفهوماً. نكتب إذاً عدداً من الأحرف أكثر من اللازم، مما يعني أن الإنكليزية التي نكتبها مسهبة، وهذا هو الحال أيضاً بالنسبة للفرنسية، ولقياس كمية المعلومات المحتواة في نص ما يجب أولاً معرفة بأي لغة هو مكتوب. عموماً، إذا أردنا

الحديث عن كمية المعلومات المحتواة في نص ما أو رسالة، يجب معرفة ما هي مجموعة الرسائل المسموح بها أو الممكن إرسالها (بين تلك التي لها طول معطى). إذا كان لدينا قائمة بالرسائل المسموح بها، يمكن ترقيمها، وحينذاك يمكننا ترميز كل رسالة برقم ترتيبها، ولن يكون في هذا الترميز أيُّ إسهاب redondance. إذن فعدد الرموز هو قياسٌ mesure جيد لكمية المعلومات في الرسائل، وهذا يقودنا إلى التعريف التالي:

حجم المعلومات = عدد الأرقام المكونة لعدد الرسائل المسموح إرسالها

ينسحب هذا التعريف على دراسة صفٍ من الرسائل المسموح بها أكثر من دراسة رسالة واحدة (هناك وجهة نظر أخرى ممكنة، وسنناقشها في فصلٍ لاحق). يجب تعديل التعريف قليلاً عندما لا يكون لكل للرسائل المختلفة نفس الاحتمال، إلا أننا لن نهتم هنا بهذا التعقيد[2].

بالتماثل مع تعريف الأنطروبية، يمكننا أيضاً أن نكتب:

كمية المعلومات = ك × لغ (عدد الرسائل المسموحة)

يُعبر عادةً عن كمية المعلومات بالبتات (من الإنكليزية *binary digits*) هذا يعني أننا نترجم الرسالة إلى أبجدية زوجية ("بالحرفين" 0 و 1) ونقيس طولها، (أو بطريقة معادلة، نأخذ ك=1/لغ2 في العلاقة السابقة).

لقد أوجد الأمريكي كلود شانون Claude Shannon في مقالة نشرت في 1948 علماً جديداً بضربةٍ واحدة: نظرية المعلومات. موضوع هذه النظرية هو حل المسألة العملية الهامة المتلخصة بكيفية نقل المعلومات بفعّالية. افترِض أن لديك دوماً مصدراً منتجاً للمعلومات بشكل دائم (سياسيٌ يلقي خطاباً، حماتك أو أخو زوجتك يثرثر على التلفون-لا نتطلب أن يكون لما يقولوه أي معنى). يمكنك اعتبار هذا الفيض من المعلومات رسائل متتابعة ذات طول معين، بالفرنسية، ومولّدة بإيقاع معين. وظيفتك كتقني هو إرسال هذه الرسائل من خلال خط اتصال، قد يكون هذا الخط كابلاً تلغرافياً قديماً، أو شعاع ليزر موجه نحو محطة فضائية بعيدة، وللخط استطاعة ***capacité***: إنها أكبر عددٍ من الرموز الثنائية (بت) يمكن بثها في الثانية. إذا كان مصدر معلوماتك يصدر عدداً من البتات في كل ثانية أكبر من استطاعة الكبل، فإنه لا يمكنك بث رسالتك (على الأقل ليس بالسرعة نفسها التي تولّد فيها) وإلا يمكنك ذلك، ولكن يبقى عليك مسألة التخلص من الحشو في الرسالة الأصلية بواسطة ترميزٍ مناسب (هذا ما يدعى **بضغط المعطيات** *compression de données*)؛ يمكن ضغط الرسالة إذا كانت مسهبة، ولكن المعلومات غير قابلة للضغط).

مسألة أخرى تفرض نفسها وهي التشويش على الخط. يمكن مواجهة هذه المسألة بزيادة الحشو في الرسالة بطريقة ملائمة، وهاك كيف: عندما ترمّز رسالتك، فإنك تُقحِم بتات معلوماتٍ إضافية تسمح

لك بالتحقق إذا ما كان التشويش قد غيّر حرفاً، وبتاتٍ أخرى تسمح لك بالتصحيح. بقولٍ آخر إنك تستخدم ترميزاً مُصححاً للأخطاء. إذا كانت استطاعة الخط كبيرة بما فيه الكفاية، والتشوش ضعيفاً، فإنه يمكنك التغلب على التشويش بفضل ترميزٍ مصلحٍ للأخطاء، أو بدقةٍ أكثر يمكنك التأكد من أن احتمال إرسال رسالة غير صحيحة هو احتمالٌ صغيّر عشوائي. يحتاج هذا بالطبع للبرهان، ونظرية الترميز المصحح للأخطاء هي نظرية صعبة، ولكن الأفكار المؤسِسة بسيطة.

تعريف المعلومات هو تقليدٌ لتعريف الأنطروبية التي تقيس كمية المصادفة الموجودة في منظومة، لكن لماذا تقاس المعلومات بمصطلحات المصادفة؟ لأنه ببساطة، باختيار رسالة من بين صفٍ من الرسائل الممكنة فإننا نتخلص من الارتياب أو من المصادفة الموجودة في ذلك الصف.

لقد كان نجاح نظرية المعلومات مدهشاً، إن كان في تفصيله الرياضي أو كان في تطبيقاته العملية. ولكن مع ذلك يجب أن نعرف أن نظرية المعلومات ككل النظريات الفيزيائية تنطبق على تمثيلات وتتجاهل بعض الخواص الهامة للواقع. يمكن لمصدر المعلومات أن ينتج سلسلةً من الرسائل المسموحة بالمصادفة (أو رسالةً لانهائية الطول مع بعض الخواص الإحصائية). لا يُطلَب أن تكون الرسائل مفيدة أو أن تكون متسقة منطقياً، أو أن يكون لها معنى. القول بأن رسالة ما تحوي كمية كبيرة من المعلومات يعني القول أنها اختيرت من بين صفٍ

كبير من الرسائل المسموحة، أو أنه يوجد الكثير من المصادفة، هذه المصادفة يمكن أن تقابل جزئياً معلوماتٍ مفيدة، والجزء الآخر يقابل تشويشاً لا قيمة له.

لنناقش مثالاً وهو الألحان الموسيقية، ولندع جانباً مختلف التفاصيل ونعتبر الألحان كرسائل حيث الأبجدية فيها هي سلم الأنغام (gamme). يمكننا محاولة إيجاد كمية المعلومات (أو المصادفة) المحتواة في لحن بدراسة تواتر العلامات الموسيقية المختلفة، وإحصاء الفواصل بين العلامات الموسيقية المتتالية (هذا إجراء نموذجي في نظرية المعلومات[4]). لقد ذكرت في فصل سابق أن الموسيقى القديمة تستعمل على الأغلب الفواصل الصغيرة، وبذلك هنالك عدد صغير من الفواصل. أما في الموسيقى المعاصرة فنجد تشكيلاتٍ متنامية من الفواصل المتكررة، نستنتج من هذا أنه في الموسيقى الكلاسيكية الغربية هنالك تنامٍ تدريجي في كمية المعلومات، أو المصادفة في الألحان الموسيقية[5]. هذه النتيجة مهمة، ولكن يجب أخذها بشيء من الحذر، ففي الحقيقة هنالك انتظاماتٌ أخرى في اللحن غير تلك الموصّفة بإحصاء الفواصل بين العلامات الموسيقية المتعاقبة. للقطعة الموسيقية بداية ونهاية، والكثير من البنى بينهما . لا تقابل هذه البنى فقط ترابطاتٍ corrélations بين العلامات الموسيقية المتعاقبة (إحصاء الفواصل)، ولكنها تقابل أيضاً ترابطات ذات مدىً أطول (ترابطات تمتد على طول القطعة). إن من الصعب الأخذ في الاعتبار الترابطات ذات المدى الطويل من وجهة نظر نظرية المعلومات، ولذلك ستنسى.

بالإضافة إلى ذلك يمكن للمعلومات التي توجد في لحن أن تكون خيالية ومبدعة، أو بائسة وفاقدة المعنى. إذا وضعنا ورقة موسيقى على خريطة سماوية، وعيّنا العلامات الموسيقية على مواقع النجوم نحصل على "موسيقى سماوية" تحوي الكثير من المعلومات، ولكن لا يمكن القول أنها موسيقى جيدة.

إن كمية المعلومات المحتواة في عملٍ فني هي فكرةٌ هامة (يمكن تحديدها بالنسبة للرسم، كما يمكن أن تحدد أيضاً في حالة الشعر والموسيقى)، وهذا لا يعني أن مواصفاتٍ عالية تقابل كمية معلوماتٍ كبيرة أو -على العكس- صغيرة. بالطبع لا يمكن الحديث عن فن دون حدٍ أدنى من المعلومات، ولكن بعض الفنانين جربوا قيماً ضعيفة جداً. وبالعكس فالعديد من الأعمال الفنية (رسم أو روايات) تحوي كمية كبيرة من المعلومات[6].

ربما بدأت بالشعور بنفاذ الصبر قليلاً. في الحقيقة، إنني أبحث في موضوع كمية المعلومات المحتواة في الرسائل وفي الأعمال الفنية، ولكنني أمتنع - باعتناء - عن الحديث حول مسألة معانيها. قد تقول أن هذا هو التوجه المعتاد والمزعج للعلميين، اللذين يهتمون بانتظام بالمظهر الأكثر شكلية والأكثر سطحية، ويفقدون بذلك رؤية المهم. للرد على هذا الانتقاد، من الضروري أن نرى أن قيمة العلم تكمن في الإجابات الجيدة (وإذا أمكن الأجابات البسيطة) التي يمكن أن يقدمها، أكثر من كونها في عمق المسائل التي يمكن أن يهتم بها. من

البيّن أن مسألة المعنى والمغزى هي مسألةٌ عميقة ومعقدة، فهي تتعلق - من بين أشياء أخرى - بمسألة عمل الدماغ التي نجهلها. لذا لا يجب أن نفاجأ بتناول العلم للمظاهر السطحيَة لمسألة المعنى فقط. أحد هذه المظاهر السطحية هو دراسة كمية المعلومات، بالمعنى الذي ندرسه في هذا الفصل، ومن المدهش أن نرى إلى أين يقودنا هذا. يمكننا قياس كمية المعلومات كما نقيس كمية الأنطروبية أو التيار الكهربائي. ليس لهذا القياس تطبيقات عملية فقط، ولكنه يعطينا أيضاً بعض الأفكار المهمة حول الفن. نحب بالطبع أن نطرح أسئلة أكثر طموحاً، ولكن من الواضح أن هذه الأسئلة الطموحة جداً تتجاوز في أغلب الأحيان إمكانياتنا في التحليل. لنتأمل في الألحان الموسيقية، ها هي رسائل نظن أننا نفهمها بعمق، ولكننا عاجزون عن أن نشرح مغزاها. إن وجود الموسيقى هو عارٌ ثقافي دائم، ولكنه ليس إلا عاراً بين أشياء أخرى. يعرف العلميون كم هو صعب تحليل الظواهر الفيزيائية البسيطة مثل غليان الماء أو تجمده، ولذا لا يندهشون كثيراً حين يرون أن الكثير من الأسئلة التي تتعلق بالروح البشرية (أو حول عمل الدماغ) تتجاوز في المرحلة الحالية إمكانيات فهمنا.

الفصل الثاني والعشرون

التعقيد الخوارزمي

يتقدم العلم بابتداع مفاهيم جديدة: تمثيلات جديدة في الفيزياء، تعاريف جديدة في الرياضيات. بعد بعض الوقت، تتكشف بعض الأفكار الجديدة عن كونها غير طبيعية، وغير مثمرة، وبالمقابل تظهر أخرى أكثر فائدة وأكثر أساسية مما كان يُظَن. وهكذا تبين أن فكرة المعلومات هي أحد أكثر التصورات إنتاجاً من بين تلك التي ابتدعها العلم الحديث. من بين عدة أشياء أخرى، تسمح المعلومات لنا بمواجهة مسألة التعقيد.

تحيط بنا أشياء معقدة، ولكن ما هو التعقيد؟ العضويات الحية معقدة، الرياضيات معقدة وتركيب صاروخ فضائي هو شيء معقد، فما الذي تشترك به هذه الأشياء؟ نعم، ربما كونها تحوي كمية كبيرة من المعلومات التي من الصعب الحصول عليها. نحن غير قادرين في الوقت الحاضر على خلق عضويات حية، ونجد الكثير من الصعوبات في برهان بعض النظريات الرياضية، كما يلزمنا الكثير من الجهد لتصميم وإنجاز صاروخ فضائي.

إن موضوعاً (فيزيائياً أو فكرياً) هو موضوع معقد إذا كان يحوي معلومات من الصعب الحصول عليها، وبما أننا لم نحدد ماذا نعني بـ"من الصعب الحصول"، فإن ليس لتعريفنا للتعقيد معنىً محدد بدقة. في الحقيقة، تسمح الفرنسية، مثل كل اللغات الأخرى الطبيعية التي يستعملها الإنسان في حياته اليومية، لنا بتعاريف غامضة وغير محددة بشكل عجيب من مثل التعريف الذي وضعناه للتعقيد. كثيراً ما يكون عدم الدقة هذا فضيلة أكثر منه سيئة، ولكن إذا كنا نريد أن نعمل في مجالي العلم فعلينا أن نكون أكثر حزماً وأكثر جزماً، ولهذا لن يكون هنالك تعريفٌ واحد للتعقيد بل تعاريف عدة، وذلك بحسب الإطار الذي نضع أنفسنا فيه. وهكذا فإن مناقشة جدية لتعقيد الحياة يجب أن تأخذ بالحسبان الإطار الفيزيائي للكون حيث تنتشر الحياة. هنالك تصورات للتعقيد يمكن تحليلها في إطار رياضي صرف، وسأناقش الآن أحد هذه التصورات، وهو **التعقيد الخوارزمي** *complexité algorithmique*.

باختصار، الخوارزمية هي طريقة منهجية للقيام بعمل محدد، أو لحل مسألة معينة. المسألة هي من طبيعة رياضية، وتتلخص بالعمل على معطيات مرمّزة ومحددة، للوصول إلى نتيجة بعد عدد محدد من المنابلات الموضّحة دون لبس. لقد تعلمنا جميعاً مثلاً خوارزمية ضرب عددين صحيحين. تعمل الخوارزمية دوماً على رسالةٍ من المعطيات، مثل "4×3" (مكتوبة بالرموز 0، 1، 2، 3، 4 ... 9) وتعطي رسالةً تعبر عن

النتيجة مثل "12". أسهل طريقة للقيام بعملية الجداء هذه الأيام هو باستعمال الحاسب، ويمكن تعريف الخوارزمية كعملٍ قابل للتنفيذ من قبل الحاسب (محتوياً على برنامج مناسب). ما نعنيه هنا بالحاسب هو آلة مجردة خيالية نوعاً ما: الآلة (بما فيها البرنامج) محدودة، إلا أن تحت تصرفها ذاكرة لانهائية، (لا نريد الحد من تعريف الخوارزمية ببساطة لأن الحاسبات التجارية لا يمكن أن تدخل في ذاكرتها عدداً مكوناً من E100 رقماً).

لقد اخترع ووصّف الرياضي البريطاني ألان تورينغ Alan Turing بدقة حاسباً قابلاً للدراسة النظرية للخوارزمية (إلا أن هذه الآلة عديمة الجدوى للاستخدام العملي بشكلٍ ملحوظ).

إن لآلة تورينغ machine de Turing عددٌ محدودٌ **من الحالات الداخلية**: حالات فعّالة وحالة توقف، تنفذ الآلة عملها على شريط من الورق لامنته مقسم إلى مربعات متتابعة (يعمل هذا الشريط كذاكرة)، كل مربع من الشريط مؤشر عليه برمز من أبجدية محدودة، أحد هذه الرموز هو الفراغ. تعمل آلة تورينغ بدوراتٍ متتالية بطريقة متوقعة تماماً؛ إذا كانت في حالة التوقف، فإنها لا تعمل شيئاً، وإلا فإنها تقرأ المربع الذي توجد فيه، وبحسب حالتها الداخلية وما تقرأ تقوم بالأعمال التالية:

(أ) تمحي ما هو مكتوب وتكتب شيئاً آخر (أو الشيء نفسه) في المربع.

(ب) تتحول إلى المربع الذي إلى اليسار أو الذي إلى اليمين.

(ج) تنتقل إلى حالة داخلية أخرى.

إذا كانت الحالة الداخلية الجديدة حالة فعالة، تبدأ الآلة دورة أخرى، محددة بمحتوى المربع الجديد وبحالتها الداخلية الجديدة.

في وضع البداية، يحوي الشريط على رسالة محددة هي رسالة المعطيات (باقي الشريط هو فراغ، أي أنه مكون من مربعات مؤشرة بالرمز فراغ). تنطلق الآلة من طرف البداية لرسالة المعطيات، والأمور مرتبة بحيث عندما تتوقف الآلة، تكون الآلة قد كتبت رسالة جديدة تمثل "استجابتها" أو رسالة النتيجة. يمكن للجواب أن يكون نعم أو لا أو يمكن أن يكون رقماً، أو يمكن أن يكون رسالة أطول. يمكن الترتيب بحيث تقوم آلة تورينغ بالجمع أو جداء أعداد تامة، أو تقوم بشيء آخر من مثل ما يقوم به حاسب عادي، حيث أننا لسنا بحاجة لعدد غير محدد من الآلات المختلفة للقيام بأعمال مختلفة لأنه توجد آلة تورينغ عامة universal Turing machine. لتشغيل خوارزمية معينة على هذه الآلة، يجب علينا أن نكتب على الشريط رسالة المعطيات التي تحوي وصفاً للخوارزمية وللمعطيات الخاصة التي نريد العمل عليها[1].

باختصار الخوارزمية هي طريقة منهجية للقيام بعمل معين، ويمكن استخدام حاسب لتطبيق الخوارزمية. يكفي في الواقع استخدام هذا النوع من الحواسيب البدائية جداً والتي تدعى بآلة تورينغ. للقيام بعملٍ معين قد يكون هناك خوارزميات ناجعة وأخرى غير

ناجعة، وذلك بحسب عدد دورات آلة تورينغ الضرورية للحصول على جواب. يعتمد التعقيد الخوارزمي لمسألة على وجود خوارزميات ناجعة لحل هذه المسألة، ولمعرفة فيما إذا كانت خوارزمية ما ناجعة أم لا، نقارن طول رسالة المعطيات L والزمن T (عدد دورات آلة تورينغ العامة) اللازم للحصول على جواب. إذا تزايدت T بالتناسب مع L^n، أي أنه إذا وُجدت ثوابت C, n بحيث:

$$T \le C(L+1)^{n}$$

نقول أن لدينا خوارزمية ذات زمنٍ **"كثيرِ حدودي"** polynomiale (وسبب هذا الاسم هو أن $C(L+1)^n$ هو كثير حدود بـ L).

تُعتَبَر الخوارزمية ذات الزمن "الكثير حدودي" ناجعة، ويقال عن المسألة المقابلة أنها قابلة للمعالجة. إذا كانت n=1، فإن الزمن الذي تأخذه الخوارزمية يكون إجمالاً متناسباً مع طول المعطيات؛ إذا كانت n=2، فإن الزمن سيكون متناسباً مع مربع طول المعطيات، الخ. يمكننا بيان أن صفة قابلية المعالجة لمسألة ما لا تتعلق باختيار نوع آلة تورينغ المستعملة. لننظر مثلاً في المسألة حيث رسالة المعطيات هو عدد صحيح، ونريد معرفة فيما إذا كان يقسم على 2 أو 3 أو 7، لا تفاجئ حين تعلم أن مسائلَ من هذا النوع قابلةٌ للمعالجة (وبدون شك فلقد تعلمت في المدرسة الخوارزميات الناجعة والتي تسمح بحل هذه المسألة).

إن الحواسيب الحديثة هي بشكلٍ أساسي آلات تورينغ عامة (ما ينقصها هو ذاكرة حقيقة غير محدودة). من المهم إذن معرفة أيُّ

المسائل قابلٌ للمعالجة، أي المسائل التي يوجد لها خوارزمية ناجعة، ولكن اكتشاف خوارزمية كهذه ربما يكون صعباً. وهكذا لم نتمكن من الحصول على خوارزميات ذوات أزمنة من كثيرات الحدود لأجل **البرمجة الخطية**[2] إلا من حوالي عدة سنوات. تكمن - من الناحية التقنية - مسألة البرمجة الخطية في إيجاد الحد الأعلى لتابع خطي على كثير سطوح محدب. تقود نظرية النهايات الصغرى في نظرية الألعاب إلى مسألة من هذا النوع، كما يقود الاستخدام الأمثل للموارد الاقتصادية أيضاً إلى مسائل برمجة خطية، ويمكن في هذه الحالة إذن إيجاد خوارزمية ناجعة لها نتائج عملية هامة.

مع ذلك فإنه ليست كل المسائل قابلة للمعالجة. لنفترض أن الطريقة الوحيدة التي لدينا لمعالجة مسألة ما تتطلب دراسةً -حالةً بحالة- لكل الرسائل من طول L المكتوبة بأبجدية ثنائية، هذا يحتاج زمناً:

$$T \geq 2^L$$

يتضاعف هنا الوقت الأصغري المقدّر لحل المسألة عندما يزداد طول المعطيات L بـ 1. لقد رأينا أمثلة عن التزايد الأسي من هذا النوع في الفصول السابقة، وتحققنا من أن تزايداً من هذا النوع يعطي أرقاماً كبيرة جداً بسرعة. وهكذا فإن خوارزمية ذات زمن أسي هي خوارزمية ذات فائدة محدودة. على العموم إن مسألةً لا يوجد لأجلها خوارزمية ذات زمنٍ كثير حدودي، تعتبر **غير قابلة للمعالجة** *intraitable*.

إذن ما هي الأمثلة على المسائل غير القابلة للمعالجة؟ ولماذا هي كذلك؟ أقترح أن تعرض هذه الأسئلة على اختصاصي في المعلوماتية النظرية إذا كان أحد أصدقائك واحداً منهم. وتوقع ساعاتٍ للجواب، وحاول أن يكون تحت تصرفك لوحٌ أسود، ليس لأن هذا صعب الشرح ولكن لنقل ... أنه تقنيٌ نوعاً ما، ولكنه أيضاً ممتع جداً. سيعرّف صديقك هذه المسائل غير الحدودية والتامة np complets[3]، غير الحدودية والصعبة np difficiles، وسيشرح لك أن هذه المسائل من المفترض أنها غير قابلة للمعالجة. سيكون مدهشاً أن يبرهن على أن المسائل غير الحدودية التامة np complets (أو صعبة) غير قابلة للمعالجة، وسيكون أكثر إدهاشاً إذا برهن على أنه يمكن معالجتها....

هل أنت محتار؟ كل ما يمكنني فعله بعقلانية هنا هو أن أعطي إشارات مقتضبة حول هذه الأسئلة، وأمثلة لمسائل يظن المختصون أنها غير قابلة للمعالجة.

هنالك مثال يرد كثيراً هو مسألة التاجر المتجول. يعطوك المسافات بين عدد من المدن ويخصّوك برقم كيلومتراج كلي (تُمثل المسافات والكيلومتراج بواحدة الكيلومتر أو بأي وحدة أخرى). السؤال هو حول ما إذا كان يوجد مسار يصل كل المدن بحيث لايتجاوز طوله العدد المخصص للكيلومتراج، والمطلوب هو الجواب بنعم أو لا. إذا أُقترِح مسارٌ معين، فإنه من السهل التحقق فيما إذا كان

شرط الكيلومتراج الكلي محققاً. وبالعكس فإنه ليس من العملي تجريب كل المسارات الممكنة الواحد تلو الآخر عندما يكون عدد المدن الواجب وصلها كبيراً؛ مسألة التاجر المتجول هي مثال على المسائل اللاحدودية التامة.

حسب التعريف الذي نتبعه هنا، تتطلب المسائل من النوع اللاحدودي التام جواباً بنعم أو لا، ويُطلب أيضاً إذا وجد جوابٌ إيجابي أن يكون من الممكن التحقق منه في زمن كثير حدودي (هناك عدم تناظر بين الأجوبة، ففي حالة جواب النفي لا يطلب التحقق منه في زمنٍ كثيرِ حدودي). لنفترض أنه لديك مسألة مفضلة من النوع المبحوث ولنسميها المسألة س، ولنفترض أن المسألة س يمكن حلها في زمنٍ كثير حدودي إذا كان لديك إمكانية الوصول الحر إلى حلول مسألة التاجر المتجول، ولنفترض أن مسألة التاجر المتجول يمكن حلها في زمن كثير حدودي إذا كان لديك إمكانية الوصول الحر إلى حلول المسألة س، نقول حينذاك أن المسألة س هي لاحدودية تامة. رغم الجهود الكثيرة لم نتمكن من إيجاد خوارزمية كثير حدودية لحل مسائل لاحدودية تامة، ويُظن عموماً أنه لا يوجد حلول لها، وبالتالي أن هذه المسائل لا يمكن معالجتها، ولكن لم يبرهن على هذا حتى الآن. من المفيد تقديم مسائل يُقال عنها لاحدودية وصعبة، وهي على الأقل بنفس صعوبة المسائل اللاحدودية التامة، ولكنها لا تتطلب جواباً بلا أو بنعم (حسب تعريف جاري Garey وجونسون Johnson الذي نتبعه هنا، عد للملاحظة 1).وهاك مثال مسألة "كأس الدوران" *verre de spin*:

رسالة المعطيات هي قائمة من الأعداد a(i,j) التي قيمها هي 1+ أو 1-، حيث i وj تتحول من 1 وحتى n (مثلاً من 1 إلى 100، في هذه الحالة يوجد 10000 عدد من 1+ و1- في القائمة)، وما نريد حسابه هو القيمة الأعظمية للتركيب:

$$E = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} a(i,j)x(i)x(j)$$

حيث القيم المسموح بها لـ x(1)، ...... x(n) هي من جديد 1+ أو 1-، إذن يجب جمع حدود n مربع، كل واحد منها يساوي إلى 1+ أو 1- وجعل الناتج أعظمياً. قد ترفض الاعتقاد بأن هذه المسألة غير قابلة للمعالجة، وربما كان لديك حق، ولكن لم يجد أحد خوارزمية ناجعة لحلها، (لاحظ أن رسالة المعطيات تحوي n مربع بت، وأن دراسة حالة بحالة تتطلب دراسة 2^n حالة). إن مسألة "كأس الدوران" هي نموذج أصلي لعائلة من المسائل التي تنتمي لفيزياء المنظومات غير المرتبة (systemes désordonnés)[4]، (إنه التفاعل interaction a(i,j) ما بين المواقع i وj والتي هي غير مرتبة). مسألة إيجاد أكبر قيمة لـ E هي مسألة مشابهة لمسألة إيجاد أعلى قمة في سلسلة من الجبال (أنظر الشكل 1) ولكن ما هو سهل بالنسبة للحالة التي في الشكل (حيث أن س تتحول في مجال على اليمين)، صعب في حالة مسألة "كأس الدوران". في الواقع، إن هندسة القمم والوديان هنا هي في فراغ ذو n بعد .... ولا يمكننا معالجتها (حتى إذا كان لكل من الـ n بعد القيم الممكنة هي 1+ و1-).



الشكل 1. ما هي القيمة العظمى لـ E(x)

تعطينا مسألة "كأس الدوران" المناسبة لتقديم تمثيل أو بالأحرى استعارة عن مسألة الحياة. حسب الاستعارة، تتعلق مسألة الحياة بإيجاد رسالة وراثية x(1) ..... x(n) تحقق قيمة عالية لتركيب معقد مثل E الوارد في الأعلى. وحسب ما قلناه، فإن هذه ربما كانت مسألة صعبة للغاية. هنالك إشارات إلى أن الاستعارة الممثلة لمسألة الحياة التي ذكرناها ليست دون علاقة بالواقع[5].

يمكن أن تفيد أيضاً فكرة التعقيد الخوارزمي ككناية عن صعوبة برهان نظرياتٍ رياضية أو في بناء صواريخ فضائية. مع ذلك سنرى أن برهان النظريات يقود إلى مستويات أعمق في التعقيد من تلك التي للمسائل اللاحدودية التامة: أكثر عمقاً وأكثر غموضاً؛ أكثر رعباً.

الفصل الثالث والعشرون

التعقيد ونظرية غودل

نشر في سنة 1931 المنطقي من أصل نمساوي كورت غودل Kurt Gödel، ما يمكن اعتباره بالتأكيد النتيجة التصورية الأكثر عمقاً فيما أنتجته الإنسانية خلال القرن العشرين. أتذكر أني رأيت غودل في معهد الدراسات المتقدمة في برنستون، في الستينات وأوائل السبعينات. لقد كان رجلاً صفراوياً ونحيفاً، وكان يضع في أذنيه سدادات من القطن. وهاك قصة نموذجية سمعتها عنه[1]: لقد سمح لزميل زائر أن يستعمل مكتبه بينما كان هو غائباً، وعند مغادرته، ترك له الزميل ملحوظة شكر على مكتبه متأسفاً على عدم لقائه، ومعبراً عن رغبته بالتعرف عليه بصورة أكثر حميمية في مناسبة أخرى. بعد ذلك بوقت وجد الزميل بين رسائله ظرفاً مرسلاً من غودل، يحوي هذا الظرف ملحوظة الزميل إلى غودل وقد وضع خط تحت العبارة: "آمل أن نتعارف بطريقة أكثر حميمية في مناسبة أخرى"، وقد أضيف بالقلم الرصاص: "ماذا تريد أن تقول بذلك تماماً"؟

لقد توفي غودل بسبب نقص التغذية في 1978، يظهر أنه كان يخاف أن يسمم، والله أعلم، ورفض الطعام.

إذا حسبت انتحار لودفيغ بولتزمان وآلان تورينغ (الذي كان شاذاً جنسياً في وقت لم يكن ذلك مقبولاً)، يمكنك أن تصل إلى نتيجة أن العلميين هم أناس انتحاريون. هذه النتيجة، مع ذلك، هي خاطئة تماماً، فمعظم العلميين هم أناس جد طبيعيون، ربما إلى الدرجة التي تجعلهم مضجرين ولا خيال لهم، وأظن أن لا أحد يعاندني إذا أكدت أن الكثير منهم مضجرٌ ودون خيال في أعماله العلمية أيضاً، وحتى في أوراق نعيهم، فهي عادةً فارغة ونمطية، تعبر عن الحزن "لغيابهم المبكر". هنالك في فرنسا لائحة مدرجة بألقابهم وأوسمتهم، أما في الولايات المتحدة فيتم التركيز على صفاتهم العائلية (التي لا يعتد بها عادة)، على مداومتهم على الحضور إلى الكنيسة أو اهتمامهم بالأعمال الكنسية، كما يُحتفل أيضاً بـ"حماسهم التواصلي" (الذي يصفه الأميركيون بـ "المعدي") وتفاهات أخرى، (الحماس المعدي هو مرض بشع، ولكنه غالباً ما لا يُشخص إلا بعد موت المريض).

ولكن لنعد إلى كورت غودل، فمهما كانت مشاكله إلا أنه لم يكن يشكو من الحماس المعدي (ولم يجعل الناس الذين حوله يتألمون منها).

لفهم اكتشاف غودل، ربما كان من المفيد أن نتأملّ في صفات شخصيته: نظام، شح، عُنْد، وهي صفاتٌ شائعة بين العلميين (وخاصة

الرياضيين) ومفيدة لهم، وقد ربط فرويد هذه الصفات الشخصية باستعداد لعصاب استحوازي ولمرحلة السادية - الشرجية من تطور الليبيدو[2]. مهما يكن، فإن الصفات الشخصية المذكورة تجعل من الطبيعي فكرة تمثيل الرياضيات وقواعد استنتاجها أكثر ما يمكن نقاوة وتنظيماً. الأمل الكبير إذن هو بتأسيس الرياضيات على قواعد استدلال منطقي محدد تماماً، وعلى عدد محدود من القضايا الأساسية الواضحة تماماً والتي ندعوها بالبديهيات. لقد تنامى هذا الحلم منذ إقليدس اليوناني (حوالي 500 قبل الميلاد) وحتى دافيد هيلبرت الرياضي الألماني الكبير (1862-1943)، وقاد إلى صيغة متنامية لمجمل الرياضيات، تمت فيها صياغة حساب الأعداد الصحيحة باكراً بشكلٍ خاص. لقد كان منتهى أمل الرياضيين الكبير: أن نستطيع لأجل أي قضية مصاغة بدقة تتعلق بالأعداد الصحيحة، الإقرار بطريقةٍ نظامية فيما إذا كانت صحيحة أم باطلة؛ هذا هو الأمل الذي قتله غودل.

لقد بّين غودل أنه إذا ثبتنا قواعد الاستدلال وعدداً محدداً ما من البديهيات axiom، فإن هنالك قضايا مصاغة بدقة لا يمكننا البرهنة فيما إذا كانت صحيحة أو كانت باطلة. بدقةٍ أكثر، لنفترض أن البديهيات المقبولة بصدد الأعداد الصحيحة غير متناقضة، إذن لا يمكننا أبداً بالتطبيق المتكرر لقواعد الاستدلال أن نبرهن أن قضايا ما هي صحيحة وباطلة في الآن نفسه. إذن هناك خواصاً صحيحة vraie

للأعداد الصحيحة [3]، لا يمكن استنتاجها من البديهيات. وإذا قبلت بهذه الخاصية كبديهية جديدة، فإن خواصاً أخرى تبقى دحوضة لايمكن برهنتها.

تلعب نظرية غودل دوراً محورياً في فهمنا لأسس الرياضيات. في البدء، كانت الصدمة قاسية، ثم حدث تغيّر تدريجي في منظومات اعتقاد الرياضيين، وفي نفس الوقت بُسِّط البرهان المعقد للنظرية، وأتى التبسيط نتيجة إدخال تصورات جديدة، جزءٌ من قبل غودل، والجزء الآخر من قبل آخرين (ماكينة تورينغ هي مثال). وهكذا فإن اكتشاف نظرية اللاتمامية غيّر تدريجياً المنظر العام للرياضيات. والنتيجة أن هذه النظرية تظهر لنا اليوم طبيعية، وتبدو في الواقع مفروغاً منها نوعاً ما. كان الحلم الكبير أن مجموعة منتهية من القضايا الصحيحة (البديهيات) تشكل أساساً، نستطيع منه استنتاج كل القضايا الصحيحة المتعلقة بالأعداد الصحيحة. نعلم الآن أن مجموعة جميع خواص الأعداد الصحيحة (أي مجموعة كل القضايا الصحيحة التي تتعلق بهذه الأعداد) ليس لها أساس منته base finie، وهناك أيضاً تفسير حدسي لغياب الأساس المنتهي، وهذا التفسير كما سنرى يعمل على إدخال مفهوم المعلومات.

لقد رأينا سابقاً كيف أن كمية المعلومات المحتواة في رسالة معرَّفة عندما نعرّف مجموعة كل الرسائل المسموحة، وبخاصة إذا كانت كل الرسائل المشكلة من الرموز 0 و1 مقبولة، حينذاك تحوي

متوالية من مليون 0 كمية من المعلومات مقدّرة بمليون بت. هناك فكرة أخرى مختلفة، تعود إلى سولومونوف، كولموغوروف، وشاتين[4] هي اعتبار الطول (بالبتات) لأقصر برنامج حاسوبي يُنتج الرسالة التي نهتم بها كرسالة جوابية. في الحالة التي نحن فيها برنامج (أو رسالة معطيات) من نوع "اطبع مليون 0" وطولها سيكون أقصر بكثير من مليون بت. دعيت الكمية المعرّفة بهذا الشكل بـ **المعلومات الخوارزمية** أو **تعقيد كولموغوروف - شاتين** *complexité de Kolmogorov-Chaitin* وهي تعبر عن **تعقيد** بمعنى أنها تقيس صعوبة إنتاج الرسالة (صعوبة: بمعنى طول البرنامج بالبتات، وليس بمعنى زمن الحساب) وحسب اختيار الحاسب سيكون لدينا تعاريف مختلفة قليلاً، يمكن أن نفترض أننا نستعمل آلة تورينغ العامة.

إذا كانت الرسالة "بلابلابلا..." تحوي على مليون بتة فإن تعقيدها kc (تعقيد كولموغوروف-شاتين) لا يمكن أن يحوي أكثر من مليون بت حيث أنه يمكننا الحصول على هذه الرسالة باستعمال البرنامج (اطبع "بلابلابلا..."). علاوةً على ذلك، إذا كانت كمية المعلومات لرسالة ما هي من مليون بت، فإن تعقيدها kc ليس عادة أقل من مليون، (إذا افترضنا مثلاً أن الكثير من الرسائل يمكن أن تضغط إلى عشرة بالمائة من طولها الأصلي، فإننا نقع في تناقض)؛ لا تظهر الملاحظات التي قدمتها أية صعوبة.

سأهتم الآن بمسألة أكثر صعوبة: إذا أعطيت رسالة ما، عيّن تعقيد kc (تعقيد كولوغوروف-شاتين) الموافق لها. ولكن... يظهر لي

أنني أراك تتثاءب! إن التعقيد kc لا يهمك؟ إنها تضجرك؟ سأستفيد من عدم انتباهك، لأعطيك نصائح سيئة ... وبعد عدة دقائق ستغرق في مفارقات منطقية وستطلب الرحمة.

كيف سنحدد التعقيد kc لرسالة "بلابلابلا ..." بطول مليون بت؟ يكفينا وضع لائحة بكل البرامج الأطول قليلاً من مليون بت، وإدخالها الواحدة تلو الأخرى في حاسبنا وتفحص الرسائل الجوابية. سيكون طول أصغر برنامج يكون جوابه "بلابلابلا ...." هو تعقيد kc لهذه الرسالة. لا شيء أسهل من ذلك، عملياً هذا يمكن أن يأخذ وقتاً أطول بقليل، ولكن من حيث المبدأ لن تجد سبباً يمنعك من العمل كما أشرنا، أليس كذلك؟

جيد، جيد، جيد! ما دمنا في خضم المسألة، يمكننا أن نسأل الحاسب أن يطبع الرسالة الأولى، بالترتيب الأبجدي، من بين الرسائل التي "تعقيد kc" الموافق لها لا يقل عن مليون. أدع لك تحديد الترتيب الأبجدي في هذا المقام، وأدَعُ لك أيضاً كتابة "البرنامج الفائق" الذي يطبع الرسالة الأولى (بالترتيب الأبجدي) والذي تعقيد kc الموافق له لا يقل عن مليون. هذا البرنامج الفائق يجب أن يكون قصيراً بشكلٍ كافٍ (يتحقق من عدد محدود من البرامج ويطبع النتيجة). إذا كان لديك أدنى موهبة في البرمجة، فإن طول برنامجك الفائق يجب أن يكون أقل من مليون بت .... وها أنت قد غرقت حتى الرقبة في المفارقات المنطقية، وتطلب الرحمة: ببرنامج طوله أقل من مليون بت

حددت رسالة لها تعقيد kc لا يقل عن المليون، بتعارضٍ واضح لتعريف التعقيد kc.

ما الخطأ الذي اقترفته؟ يقول المناطقة لك أن خطأك كان بالبقاء جالساً بجانب الحاسب بعد أن أدخلت فيه البرنامج، وتخيلت ببساطة أنه سينتج جواباً خلال زمنٍ مفيد. يمكن لآلة تورينغ، بعد بعض الوقت أن تتوقف وأن تعطي رسالة جواب، ويمكن لها أن لا تتوقف أبداً، وأنت لا تعرف مسبقاً ماذا يحدث. لا يجب أن ننتظر الكثير من آلة تورينغ، وخاصةً أننا لا نعرف إذا كانت ستتوقف عندما ندخل فيها برنامجاً ما (أو رسالة معطيات): لا يوجد خوارزمية لكي نجعلها تقرر. في الواقع لا يوجد أيضاً خوارزمية لتقرير ما هو التعقيد kc لرسالة معينة؛ هذا أحد مظاهر نظرية غودل وقد اكتشفه شاتين.

ما بينه شاتين أن قضايا من نوع (الرسالة "بلابلا.." لها تعقيد kc لا يقل عن المقدار "N") هي إما خاطئة أو غير ممكنة البرهنة عندما تكون N كبيرة لدرجة كافية، لكن ما المعنى من "كبيرة لدرجة كافية"؟ هذا يعتمد على بديهيات النظرية، التي تحوي على معلومات معينة (تعتمد على طولها الإجمالي)، ولا يمكنك أن تبرهن أن "بلابلا.." تحوي معلومات أكثر من البديهيات التي تستعملها، وهذا معقول كفايةً، أليس كذلك؟ في الحقيقة، إن هذا ليس صعب البرهان أبداً[(5)].

بقي الكثير أيضاً مما يقال حول موضوع نظرية غودل، ولكني أخاف أن أغرق (وأنت أيضاً) في التفاصيل التقنية، لذلك سأكتفي ببعض الملاحظات.

ربما لاحظت بعض اللااتساق في دعاواي المتعلقة بنظرية غودل، فقد قلت أولاً إنها تتعلق بخواص الأعداد الصحيحة، ثم بدلاً من ذلك اهتممت بتعقيد الرسائل. يمكن في الواقع ترجمة القضايا المنطقية (المتعلقة مثلاً بتعقيد الرسائل) بخواص للأعداد الصحيحة. إن غودل هو من بدأ هذا النوع من اللعب، التي كانت ذروته حل"المسألة العاشرة لهيلبرت"[6]. ولذلك فإنه من قليل الأهمية أننا لم نتكلم بإسهاب عن خواص الأعداد الصحيحة.

من وجهة النظر التي اعتمدناها نلاحظ أن القضية الحرجة بالنسبة لنظرية غودل، هي أننا لا نعرف فيما إذا كانت آلة تورينغ ستتوقف أم لا عندما ندخل فيها برنامجاً ما. لبرامجَ من طولٍ معطى، إما أن تعمل الآلة حتى زمن أعظمي ثم تتوقف، أو أنها ستتابع العمل دون حدود ولن تتوقف أبداً. إذا كنا نعرف الوقت الأعظمي للتوقف من أجل كل أطوال البرامج، فإنه يمكننا الحكم أي البرامج ستتوقف فيها الآلة، وأيها التي ستعمل فيها الآلة دون توقف (يكفي أن ندع الآلة تعمل حتى زمن التوقف الأعظمي لأجل طول برنامج معطى؛ إذا تابعت الآلة العمل في تلك اللحظة، فإنها لن تتوقف أبداً). ولكن الأمر الأساسي هو أننا لا نعرف زمن التوقف الأعظمي، ولا يمكننا معرفته لأنه يتزايد أسرع من أي تابع حسوب لطول البرنامج: أسرع من كثير حدود، أسرع من تابع أسي، بل أسرع من تابع أسي لتابع أسي

قررنا في الفصل السابق أنه لا يمكننا معالجة مسألة ما إذا لم يكن ممكنٌ حلها في زمن كثير الحدود (أي كثير حدود بالنسبة

لطول برنامج أو رسالة معطيات). والآن نرى كم هي بعض المسائل الرياضية أقل قابليةً للمعالجة. لقد طرحنا على أنفسنا بعض الأسئلة حول تعقيد الأشياء عموماً، ونظرية غودل تقول لنا سلفاً أن حساب الأعداد الصحيحة هو من تعقيدٍ لا يمكن تصوره.

و الآن سؤالٌ أخير: ما علاقة كل هذا بموضوع هذا الكتاب؟ ما علاقة نظرية غودل مع المصادفة؟ نعرف أنه يمكن إيجاد خواص لانهائية جديدة للأعداد الصحيحة، مستقلة عن تلك المعروفة الآن، ولكن هل هذه الخواص هي عارضة بمعنى ما؟ الجواب هو بالإيجاب، ويمكن إيجاد سلسلة من الخصائص للأعداد الصحيحة والتي هي بالمصادفة صحيحة أو باطلة (وهذا ما قام به بوضوح شاتين)[7]. بدقةٍ أكثر، يمكن تأسيساً على خواص الأعداد الصحيحة، تعريفُ متواليةٍ من الأعداد الثنائية 0 و1 المستقلة وباحتمال 1/2. هذا يعني ببساطة أنه لا تعطي أيُّ طريقةٍ في الحساب أيةَ أفضلية في المتوسط لتخمين الأرقام المتتالية للمتوالية (هذه المتوالية إذن غير حسوبة).

منطق العالم الذي نعيش فيه هو إذن مدهش، أو على الأقل هكذا هي النظرة التي يعطيها المناطقة عن هذا العالم، ولكننا نعتاد عليها. والمنظر يتغير ربما أيضاً لكي يظهر أكثر غرائبية ... و من جديد نعتاد على ذلك بعد بعض الوقت[8].

الفصل الرابع والعشرون

المعنى الحقيقي للجنس

نقترب من نهاية هذا الكتاب، ربما كنت تأسف لأنك لم تأخذ قليلاً من المبادرة. من الصحيح أنك عدى عن هز الرأس أحياناً متمتماً من التأفف احتفظت بمظهر كثير السلبية، لهذا سنغير ذلك، وأقترح أن تعمل في مشروع نبيل وكريم: خلق الحياة.

نفترض أنك كونت النجوم، والمجرات والأجسام الأخرى السماوية. لخلق الكون كان يكفيك كتابة عدة معادلات على قطعة ورق، وسترسل الآن رسالة إلى الكون لتخلق فيه الحياة.

إذا سمحت سأمحي الآن الأحرف الكبيرة، وسأتفحص رسالتك بعين باردة وعلمية. الشيء الذي يجب أن يكون دوماً حاضراً في ذهننا هو أن على رسالتك الحياتية أن تواجه الكثير من المصادفة. في الواقع إن الشواش الكلاسيكي والارتياب الكمومي، وحتى نظرية غودل، تُدخِل المصادفة بطرقٍ مختلفة في الكون الذي خلقته، فكيف سيؤثر هذا على رسالتك؟

لقد ناقشنا سابقاً نموذج "كأس الدوران" (modele de verre) ككناية عن الحياة، والفكرة تتلخص في أن هنالك تابعاً:

E (رسالة)

يجب على رسالتك أن تجعله أعظمياً. يمكن أن نفترض أن على رسالتك أن تتناسل وأن التابع E يتعلق باحتمال تناسل رسالة تشبه الرسالة الأصلية[1]. يحوي التابع E كل ما تعرفه رسالتك عن الكون، ويعكس بشكل خاص المصادفة الموجودة في الكون.

مسألة "كأس الدوران" (وهي بجعل E أعظمية) هي مسألة صعبة من درجة np، كما رأينا في الفصل حول التعقيد الخوارزمي. لن تضيع وقتك في محاولة حل المسألة بدقة، ولا بحلها بنفسك. ستدع رسالتك تتدبر نفسها، آملاً أنها - بتقريباتٍ متتالية - ستصل إلى قيمة عالية لـ E. رسالتك في الواقع هي رسالة وراثية، وتملك إمكانية التكاثر. تقابل التقريباتُ المتتالية الطفراتِ التي تحدث بالمصادفة، والمتبوعة بالانتخاب، وهذا ما يقودنا إلى منظورٍ أصولي نسبياً للحياة. طريقة الطفرات والانتخاب هي أيضاً طريقة في مقاربة مسألة "كأس الدوران"، ولكننا نتكلم حينذاك بطريقة مونتي - كارلو (سميت كذلك لأن المصادفة تلعب فيها دوراً، كما في الكازينو). مهما كان الاسم فإننا نرى أن هذه الطريقة في التقريب المتتالي ربما تقود إلى قيمٍ أعلى فأعلى لـ E، ولكن ليس بالضرورة إلى القيمة الأعظمية المطلقة. إذا رجعنا إلى الشكل 1 في الفصل 22، من الواضح أنه إذا قمنا

بالصعود، بتقريباتٍ متتالية، الجبلَ الخطأ فإننا سنصل إلى قمة ذلك الجبل ولكن ليس إلى قمة أعلى جبل. تسمح الطريقة الطفرات والانتخاب إذن بتطوير الحياة بشكل فعَّال، ولكنها لا تعطي نتائج أمثليّة. إضافةً إلى ذلك، كلما كانت رسالتك الوراثية طويلة كلما كانت طريقة مونتي - كارلو أقل فعالية. في الواقع، ستضيع المعلومات المحتواة في رسالتك بسرعة بالطفرات عبر الأجيال المتعاقبة، إلا إذا كانت الطفرات محددة بمستوى منخفض كفايةً[2]، ولكن هذا يعني أن السيرورة البطيئة للطفرات والانتخاب لن تقودك إلا إلى قمة جبل صغير في الشكل **1** من الفصل **22**، وأنه ليس لديك إلا حظٌ ضئيل بالوصول أبداً إلى القمم العالية.

يقود خلق الحياة، كما ترى، إلى كومة إزعاجات، فمالعمل الآن؟ قد يكون تفحص التابع: (رسالة)E الذي يحوي كل تعقيد العالم كما يظهر من وجهة نظر رسالتك الحياتية فكرةً جيدة، هل يوجد شيء غير المصادفة في هذا التابع؟ أي انتظام **regularité** يمكن نستفيد منه؟ هل الكون خالٍ كلياً من أي معنىً أو سبب؟ هل له بنية ما؟ لحسن الحظ هناك انتظامات في الكون، وهي تعبر عن نفسها حتى على مستوى رسالتك. ما يحدث هو أنه يمكنك أن تقطّع رسالتك إلى أجزاء أو عبارات لكل منها معناها الخاص:

الرسالة = (العبارة **A**، العبارة **B**، العبارة **C**، ....)

يمكن أن ندعو العبارات **.....A,B,C** أيضاً بالجينات، ومعناها أنها ترمِّز - لِنَقُل- أنزيماتٍ مختلفة، إلا أنني لا أريد أن أهتم بتفاصيل

الآلة الوراثية. من المهم هنا، فهم كيف أنه من الممكن تقطيع رسالة الحياة إلى قطعٍ ذات مغزى تقابل، بمعنًى ما مجرد، بنية الكون. لنفترض أنك (بالطفرات mutation) حصلت على رسائل جديدة مثل:

(عبارة *A، عبارة B، عبارة C، ...)

أو

(عبارة A، عبارة*B ، عبارة C، ...)

وهكذا... ولنفترض أن هذه الطفرات ليست كارثية كثيراً، بحيث أن الرسائل (....ABC)، (....A*BC)، (....AB*C) تعطي جميعها قيمة كبيرة كفايةً للتابع E. يمكن أن يعطي وضع طفرتين معقولتين معاً نتيجةً كارثية، ولكن ليس هذا هو الحال غالباً. بقولٍ آخر، كثيراً ما تكون(....A*,B*,C) رسالة وراثية معقولة إذا كانت الرسالتان (....A*,B,C) و(...A,B*,C) معقولتين، وهذا ما يعبر على مستوى التابع E أن الكون ليس فاقداً للمعنى تماماً. في الواقع، تحتفظ الحجَّة التي قدمناها بقيمتها في حال كانت ....A,B,C أجزاءً من جينات أو أحرفاً فردية (قواعد) بدلاً من جينات.

لقد وصلنا إلى نتيجة تصورية مهمة سأكررها: واقع أن هنالك بعض النظام في الكون يجد طريقه في التعبير عن نفسه على مستوى رسالتك الوراثية. لوجود نظامٍ في الكون نتيجة تتلخص الكشف عن أن قرن رسائل فيها طفرات (...A*,B, C) و(...A,B*,C) معاً في رسالة (...A*,B*,C) هو فكرةً جيدة. تدعى السيرورة التي تقوم بهذا القرن

بالجنس[3]. أما أنت كخالق، وقد وجدت أن هذا الاقتران recombinasion جيدٌ لرسالتك، لذا فإنك تبتدع الجنس وتعطيه لمخلوقاتك. هذا هو المغزى الحقيقي للجنس: أن هناك في الكون بعض الانتظام، وأن التركيب الوراثي بالنتيجة مفيد.

بدلاً من تغيير حرف في كل طفرة في الرسالة الوراثية، تتيح المصادفة الآن تغيّر كلمة أو عبارة بكلمة أو عبارة أخرى. من الواضح أن هذه السيرورة أكثر ذكاء، (لاحظ أنه يوجد أشياء أخرى يمكن عملها مثل حذف أجزاء من الرسالة الوراثية أو الاحتفاظ بعدة نسخ منها).

سمح ظهور الجنس للحياة بأن تتطور بسرعة أكبر. تستمر الطفراتُ طبعاً في التكاثر، ولكن سيرورةً مُجددة وأكثر ذكاء تتدخل لتغيير الرسائل الوراثية. وبعد كل تغيير، يعمل الانتخاب الطبيعي للإبقاء على الأصلح والأوفر حظاً[4].

لقد جعل الجنس الحياة أكثر إمتاعاً، ويمكن أن نستسلم للغنائية لوصف التعاون الحماسي للجينات والتي تقود الحياة إلى قيم أعلى دوماً للتابع (رسالة)E.

تقود الأبحاث الحديثة مع ذلك إلى رأي أكثر تحفظاً، كما وضح البيولوجي البريطاني ريتشارد دوكينز Richard Dawkins في كتابه الممتع: الجينات الأنانية The Selfish Gene[5]. يحلل دوكينز تأثير الانتخاب الطبيعي على مستوى الجينة المفردة، ويبين أن هذه

الأخيرة تحاول تأكيد تناسلها بشكل أناني، دون الاهتمام بالجينات الأخرى. لنتذكر أن الجينات هي لبنات أساسية أولية في الرسالة الوراثية، وفي غياب الطفرات فإنها تعيد إنتاج نسخٍ مشابهة، ولديها بهذا إمكانية الخلود. النباتات والحيوانات ليست إلا حوامل فانية تنقل الجينات، وتصرفها محكومٌ بهذا العمل الوحيد. هناك أسباب للاعتقاد أن هناك الكثير من الجينات المحتالة التي لا تقدم شيئاً مفيداً للنواقل التي تنقلها (والتي يمكن أن تكون ضارة). إن تعايش عدة جينات أنانية ليس شيئاً سهلاً، إنه غير فعَّال، ومن المستحسن وضع بعض النظام والانضباط في مجمَّع الجينات.

مالعمل؟ نلتفت إليك ثانية، يا أيها العالم الكبير وخالق الحياة ومخترع الجنس، لإلهامنا بفكرة تجعل الرسالة الوراثية تعمل بفعالية أكبر ....؟

أتريد أن تقول لنا أن كل هذا ما هو إلا سوء تفاهم؟ تتظاهر بأنك لم تعد مسؤولاً عن خلق الحياة؟ ولا عن تطورها؟ هل أنت متأكد من ذلك؟

هذا ما هو مخيب للآمال، لقد تخليت عن مخلوقاتك، وعلينا كتابة سيناريو جديد والبدء من جديد. وهكذا إذاً وُجِدت النجوم، والمجرات، والأجرام السماوية الأخرى. لا تعرف كيف ولا لماذا، ولكن لا يوجد أيضاً سبب وجيه لأن لا تكون هذه الأشياء موجودة. هناك الكثير من المصادفة في الكون، وهناك أيضاً ليس القليل من

التركيب. ظهرت الحياة في الكون بسهولة كما يبدو[6]، ولكننا لانعرف تماماً كيف. لقد واجهت الرسائل الوراثية الصغيرة، والتي هي لب الحياة، تعقيد الكون وتأقلمت معها، ثم اكتشفت الرسائل الوراثية الصغيرة فن التراكب الذي ندعوه بالجنس. وكانت فوائد هذا الاكتشاف عظيمة، لأنها سمحت للرسائل الوراثية لأن تحسن استغلال النظام والتركيب في الكون.

إن الرسائل الوراثية للحياة ما هي إلا مجمعات لجينات أنانية، ولكن الانتخاب الطبيعي يجبر هذه الجينات على التعاون بطريقة ليست فعَّالة تماماً. لقد خلقت الحياة تكثيراً **prolifération** في الأشكال وفي الآليات لتستخدم العالم الذي يحيط بنا، ولتستثمر الانتظامات في بنية الكون.

لأنه يوجد انتظامات في بنية الكون ولأن الحياة قادرة على استغلالها لصالحها، ظهرت خاصية جديدة للحياة بصورة بطيئة؛ وهي ما ندعوه بالذكاء.

الفصل الخامس والعشرون

ذكـــاء

كان دافيد مار David Marr اختصاصياً في معالجة معلومات الرؤية والذكاء الصناعي، وكان يعمل في معهد MIT (معهد ماساشوستس للتكنولوجيا)، ويعد كتابه رؤية Vision أحد أهم المساهمات في الكتابات العلمية للسنوات الأخيرة. قرر دافيد مار تأليف كتابه عندما علم أنه يعاني من اللوكيميا ، وأنه لم يبق له الكثير من الحياة،ولذا فإننا نفهم لماذا يخلو الكتاب "رؤية" من الطقوس المتحذلقة التي تثقل أحياناً كثيرة المؤلفات العلمية، حيث يتطرق الكتاب مباشرةً إلى الأسئلة الرئيسية.

تُعالج المعلوماتِ التي تصل إلى أعيننا في عدة مستويات، بدءاً من الشبكية وانتهاءً بفص الرؤية (منطقة في الناحية الخلفية من الدماغ)، ويعمل الجهاز بشكل مدهش في تحليل ما يجري حولنا. تفرض بعض الأسئلة نفسها من مثل: ما هي بنية نظام الرؤية لدينا؟ وكيف يعمل بالضبط؟ كيف تم تركيبه؟ ولكن دافيد مار وضع أسئلة أخرى. وهكذا إذا أردنا اختراع نظام للرؤية، انطلاقاً من الصفر، ماهي

الخيارات؟ هذه المسألة، إذا شئت، مسألةٌ لمهندس، لكن ما هي قيمة الحل البيولوجي لهذه المسألة؟ نعرف أجزاء من الأجوبة لكل من هذه الأسئلة. بوضع هذه الأجزاء معاً يمكننا أن نصل إلى منظور عام مقنع جداً، حتى وإن كانت بعض التفاصيل تبقى مشكوك فيها.

بالنسبة إلى ما يعنينا، فإن النتيجة الهامة هي: إن جهاز الرؤية الخاص بنا مبني بحيث يعامل معلومات رؤية مقابلة لواقع فيزيائي محدد تماماً، هذا ما ينتج بوضوح من تحليل دافيد مار. إن جهاز الرؤية الخاصة بنا ليس آلة عمومية لتحليل توزيعات الألوان والشدة الضوئية، إنه آلة لإدراك أشياء في فضاء ثلاثي الأبعاد وأشياء محدودة بسطوح ذات بعدين هي أيضاً محددة بحواف. يجب على جهاز الرؤية أن يعين الحواف، وأن يبني السطوح، وأن يؤولها في صيغٍ لأشياء خاضعة لإنارة معينة وموضوعة بطريقة معينة بالنسبة للمراقب، (وهناك أيضاً أشياء أخرى للعمل، مثل إدراك الحركات، وكل هذا يجب أن يتم بسرعة).

عندما نفتح أعيننا، نتلقى من العالم الخارجي كمية كبيرة من المعلومات. ولكن العالم الخارجي مبنيٌ بنظام شديد، والرسائل التي تصل إلى عيوننا هي إذن مسهبة جداً. بوضع افتراضات على صف الرسائل المسموحة، يمكننا اعتبار أن نظام الرؤية يقوم على ضغط المعطيات المستقبلة. يبدأ ضغط المعطيات هذا على مستوى الشبكية وحتى قبل أن يصل إلى فص الرؤية، تكون قد تمت معالجة الرسائل وضغطها بشكل كبير. كل ما نراه، هو صورٌ مؤولة، مؤولة من قبل

جهاز رؤيةٍ جهزّه التطور الطبيعي لمواجهة نوعٍ معين من الواقع الفيزيائي الخارجي.

لنعد الآن إلى مسألة المهندس الذي يريد اختراع جهاز رؤية فعّال، إن هذه المسألة هي مسألة ذكاءٍ صنعي، لماذا ذكاء؟ ما ندعوه ذكاءً هو فعّالية عقلية مركزها الدماغ. يقود الذكاء أفعالنا على أساس ما نتلقاه من العالم الخارجي، وتأويل رسائل الرؤية إذن جزء منه.

الرأي الطبيعي أنه لفهم الذكاء يجب أن ندرس الدماغ: بدراسة تشريحه، بتحليل نشاطه الكهربائي بواسطة أقطاب كهربائية (إلكترودات)، وبالنظر إلى خلاياه تحت المجهر الخ. بالطبع، تم إجراء كل هذه الدراسات والتجارب، ولقد قدمت معلوماتٍ هامة (وخاصة حول جهاز الرؤية). ولكن مع ذلك فإن للدراسة المباشرة للدماغ حدودها، فمن الصعب تشكيل لغةٍ طبيعية كالفرنسية بالنظر إلى الدماغ، في حين أن اللغة تلعب دون شك دوراً مهماً في تنظيم الذكاء البشري. تُظهِر مسألة اللغة أنه ليس من السهل فهم الذكاء، وأنه ليس من الحكمة الاكتفاء بمنهجيةٍ وحيدة، أكانت منهجية علم الأعصاب أم منهجية علم النفس.

إن من الطبيعي والمناسب خصوصاً التطرق لدراسة جهاز النظر باستخدام طريقة المهندس، ومن الملاحظ أيضاً أن سيغموند فرويد عالج مسألة تحليل الغريزة الجنسية بنفس الطريقة. ما يدعوه فرويد الجنس ليس تماماً نفس الشيء الذي سميناه نحن الجنس في الفصل

السابق؛ ولكن ليست الفكرتين دون صلة[2]. لقد وصف مؤسس التحليل النفسي عدداً من الدوافع الجزئية (pulsion partielles) (والتي لها علاقة غالباً مع مناطق حساسة جنسياً érogene خاصة: فموية، شرجية)، وشرح الغريزة الجنسية باستخدام هذه المصطلحات. تظهر الدوافع الجزئية مستقلةً عند الأطفال الصغار، وفي المجرى الطبيعي للأمور تنتظم لاحقاً لتصبح سلوكاً جنسياً وظيفياً، بينما يظهر السلوك الذي يقال عنه شاذاً عندما لا تتكامل الدوافع الجزئية كما يجب أن تفعل عادةً (وما يدعى "عادي" هنا يعبر عن السلوك المفضل من قبل الانتخاب الطبيعي، أي السلوك الذي يؤدي إلى التكاثر). يمكن للغريزة الجنسية وجهاز الرؤية أن يفهم أحدهما الآخر على أساس وظيفتهما. ما يقود تأويلنا هو "أخطاء" النظام: أي الشذوذات الجنسية من جانب واختلالات الرؤية من جانب آخر. في حالة نظام الرؤية، لدينا بالإضافة إلى ذلك فهمٌ أكثر تفصيلاً لكيفية معالجة المعطيات، ابتداءً من الشبكية وحتى الدماغ. بينما على العكس، لا تحظى الغريزة الجنسية بدراسة تشريحية ووظيفية مفصلة، والوضع أسوأ بالنسبة للمسائل الأخرى التي يطرحها التحليل النفسي. في الواقع إن مجد ومأساة التحليل النفسي تقبع في انعزاليته المنهجية، وهذا ما جرَّ عليه احتقار الكثير من المشتغلين بالعلم. لقد كان فرويد نفسه من المشتغلين بالعلم، ولقد كوَّن التحليل النفسي كنظرية علمية doctrine scientifique. وللأسف ابتعد التحليل النفسي، بعد أعمال متتبعيه، عن

العلم، ونأمل فقط أن يقود تجديدٌ منهجي إلى انقلاب هذا الاتجاه. بعد كل شيء فإن التحليل النفسي يهتم بمسألة "البرمجيات" logiciels التي - في يوم أو آخر - يجب أن تقوم بوَصْلَةٍ منتجة مع مسائل "التوصيلات" câblage، والتي تهتم بها علوم الأعصاب.

و لكن لنعد إلى مسألة الذكاء. بوضع الغريزة الجنسية وجهاز رؤية وبعض الآليات الأخرى من نفس النوع معاً، يمكننا بدون شك الحصول على دماغ معقول لفأر أو لقرد. ولكن أليس العقل البشري شيئاً آخر مختلف تماماً وأرقى بما لا يقاس؟ ربما لا. أحد الأسباب التي تدعو للتفكير بأن الاختلاف ليس في أقصاه هو أن التخصصات (différenciation) في الدماغ البشري أخذت وقتاً قصيراً نسبياً على مقياس التطور (عدة ملايين من السنين، أما تطور اللغات المعقدة هو بدون شك أحدث من ذلك بكثير). إذا كنا قادرين على تكوين دماغ قرد فلن نكون بدون شك بعيدين جداً عن الدماغ البشري بحدود آلياتٍ جديدة للاستعمال. وبقولٍ آخر، إن الاستعدادات البشرية الخاصة من استعمالٍ للأدوات، وتعلمٍ للغات المعقدة ربما كانت سهلة نسبياً، حتى وإن كانت تقابل تزايداً كبيراً في حجم الدماغ.

بالتأكيد لدينا قدرات ذكائية أكبر بكثير من تلك التي تملكها الفئران والقرود: يمكننا مناقشة المسألة اللاهوتية حول القدر، وأن نقرأ الشعر ونحس بالسرور من قراءته، وأن نبرهن أن متوالية الأعداد الأولية هي متوالية لا منتهية، ولكن الدماغ الذي

نستعمله مؤسسٌ على نفس الآليات التي لدماغ فأر أو قرد. إن من المؤثر أن هذا الدماغ المزعوم عظمته لا يستطيع أن يقوم بعمليات حسابية بسيطة، أن يعطي الوقت بالدقة وأن يضع في ذاكرته بعض الآلاف من الأرقام، (وهذا ما يدعونا إلى استعمال الحاسبات، والساعات، والرزنامات والدلائل). في فعاليتنا نمطية "السمو" التي تكوِّن العلم، يظهر أننا نستعمل بصورة رئيسية إمكانيتنا اللغوية وجهازنا البصري. إن تورط جهازنا البصري هو ميزة كبيرة، وهذا ما يجعل هندسة الرياضيات مهمة جداً.

لنحاول التلخيص: إن دماغنا وذكاءنا مبنيان على آليات مرتبطة بشدة بمسألة البقاء في نمط معين من المحيط. وحديثاً جداً أضاف التطور إلى الوظائف الأساسية للدماغ بعض الآليات الفائقة ذات المرونة الكبيرة. ولقد تبين أن هذه الآليات نافعة جداً، وقد حض عليها التطور الطبيعي. أحد نتائج هذه الآليات الفائقة أنها سمحت للمعرفة العلمية بأن تتطور، ويتعلق الأمر في اعتقادي بمصادفة. ينقص الدماغ البشري بعض الوظائف الأساسية المرغوب فيها جداً للعمل العلمي: القدرة على الحساب بشكل سريع ودقيق، والقدرة على التخزين في الذاكرة كميات كبيرة من المعطيات، وبالرغم من هذه النواقص فإن العلم البشري قد تطور وسمح لنا بتحليلٍ أكثر عمقاً لطبيعة الأشياء، لم نكن لنأمله منطقياً.

نعيش كما يظهر في عالم مليء بالأشياء ثلاثية الأبعاد والمحدودة بسطوح ذات بعدين[3]، إذن من الطبيعي لأدمغتنا أن تدرك هذه الأشياء:

هذا تلاؤمٌ مفيدٌ للبقاء يشجعه الانتخاب الطبيعي. ولكن الانتخاب الطبيعي لا يفسر فهمنا لكيمياء النجوم ولا الخصائص الغامضة للأعداد الأولية. يُظهر الانتخاب الطبيعي لماذا حصل البشر على الوظائف العقلية العالية، إلا أنه لا يُبين لماذا كان الكون الفيزيائي ولا عالم الرياضيات المجردة هي أيضاً في متناول إمكانات قدرتنا العقلية.

إننا مقتنعون أن العالم الفيزيائي يجب أن يُظهر الكثير من المصادفة، ونحن مقتنعون أن الكثير من القضايا الرياضية يجب أن تكون دحوضة (لا يمكن برهنتها). ومع ذلك، وباندهاش، فإننا ندرك أشياء كثيرة، إن كان فيما يتعلق بالكون الفيزيائي أو فيما يتعلق بموضوع الرياضيات.

ما ندعوه إدراك مرتبط ارتباطاً وثيقاً بالطبيعة الخاصة بالذكاء البشري.على سبيل المثال نستعمل كثيراً اللغات الطبيعية في الرياضيات. في الواقع إن دماغنا الفقير غير قادر على مواجهة النصوص الرياضية المرمزة تماماً، رغم أنها في الأساس مفضلة (ربما كنا نظن أن اللغة المستعملة من قبل الرياضيين مرمزة بشكل كاف وغير مفهومة، ولكن ليس هذا ما ندعوه بلغة رياضية مرمزة، يمكن أن نقول أن هذه اللغة jargon هي نصف مرمزة). إننا نعرض معارفنا الرياضية بشكل نظريات مختصرة، لأن وعينا يُسقط الترميزات الطويلة حقيقةً. ليس من شك أن مخلوقات ذكية غير بشرية تصنع رياضياتها بشكل مختلف عنا. لدينا فكرة عن ذلك عندما ننظر إلى

الحواسيب التي نستعملها كمساعدة في الدراسات الرياضية، (لا تفهم الحواسيب النصوص باللغة الطبيعية، ولكنها تستعمل دون أن يرمش لها جفن سلسلة طويلة من الرموز). باختصار إن الطريقة التي نعمل فيها في الرياضيات هي بشرية وبشرية جداً، ولكن معظم الرياضيين لايشكون أن هناك واقعاً رياضياً خارج وجودنا البشري المسكين. نحن نكتشف الحقيقة الرياضية، إننا لا نخترعها. نضع لأنفسنا سؤالاً ما يظهر طبيعياً، ونشتغل عليه وأحياناً نجد الجواب (أو يجده شخص آخر)، ونعرف أن الجواب لا يمكن أن يكون مختلفاً. الشيء الغريب أنه، بسبب نظرية غودل، فإنه ليس لدينا أية ضمانة أن السؤال يمكن أن يُحل. إننا لا نعلم لم كان عالم الرياضيات متاحاً لنا وفي متناولنا، ونحن نسر لأنه كذلك.

إن مفهومية العالم الفيزيائي بحدود in terms of بنًى رياضية ليس أقل إدهاشاً. لقد عبر الفيزيائي أويجين فيغنر Eugenne Wigner عن دهشته في مقالة ذات عنوان معبر: "الفعالية اللامعقولة للرياضيات في العلوم الطبيعية"[4]. لقد تعلمنا كم أن الكون فسيح، وكم أن المكان الذي نشغله فيه ضئيل، والشيء الذي لا يصدق أننا نستطيع أن نسبر أعماق هذا الكون، وأن نفهمه.

الفصل السادس والعشرون

خاتمة: العلم

لنقم بقفزة زمنية إلى الخلف، من عدة آلاف من السنين. يسقط الظلام، وقد انتهى يوم العمل، نشعل مصباح الزيت ونتجمع حوله، نأخذ بالتعليق على الحوادث المحلية الجديدة، والنشاطات الريفية القادمة، حيث يتم اختيار زمانها حسب مظهر الأبراج في السماء، نندهش من الروايات التي يقصها الرحالة واللغات الغريبة التي يتكلمونها. ينعقد نقاشٌ حول صفات الآلهة، أو حول موضوع في القانون، أو حول الفوائد الطبية لبعض النباتات. إنّ حب الاستطلاع الفكري حاضرٌ هنا، كما هي الحاجة لفهم أسرار العالم الواسع ولطبيعة الأشياء، ونحن نطبق هذا الفضول على كل نوع من المسائل: كيف نفسر الأحلام لمعرفة المستقبل، كيف نفهم الإشارات في السماء، أو كيف نحقق زاوية قائمة بقطعة خيط (برسم مثلث أطوال أضلاعه هي على التوالي 5,4,3).

والآن بعد عدة آلاف من السنين من ذلك، وبالالتفات إلى الماضي نجد أن بعض مواضيع النقاش قد طواها النسيان: لم تعد صفات الآلهة

القديمة تهمنا كثيراً، إلا أن بعض الأسئلة لم تتغير كثيراً: ما هي الطبيعة الحقيقية للفن؟ وما هو الشعور؟ كما ولّدت دراسة مسائلَ أخرى التقدمَ الهائل للعلم والتكنولوجيا، والذي غيرّ بدوره الوضع الإنساني كلياً. من تعداد الأغنام، ومن رسم الزاوية القائمة بالخيط نشأت الرياضيات، أما مراقبة حركة النجوم فأدّت إلى تشكل الميكانيك والفيزياء، ومؤخراً تطورت البيولوجيا والطب آخذةً مكان دراسة الأعشاب الطبية. إن قدر العلم كان مختلفاً عن أقدار المجالات الأخرى للفضول البشري، ليس لأن الفضول كان من طبيعة أخرى، ولكن لأن المواضيع والمفاهيم قيد البحث كانت مختلفة. لقد ظهر أن تحليل خواص المثلث أنفع من تعبير الأحلام، وتبين أن دراسة حركة البندول أكثر إنتاجية من دراسة طبيعة الشعور. يضيء العلم أحياناً المسائل الفلسفية القديمة، ولكنه يُدمر ما قبلها، ولكن غالباً ما تبقى الأسئلة التي يثيرها التأمل دون جواب،وإذا ظهرت الأجوبة فإنها تكون مقنعة فكرياً أكثر من كونها ملائمة نفسياً[1].

لم تظهر المصادفة سابقاً كموضوعٍ واعد لدراسة دقيقة، ولقد احتقرها الكثير من العاملين في العلم في الماضي، أما الآن فإنها تلعب مع ذلك دوراً محورياً في فهمنا لطبيعة الأشياء. لقد كان هدف هذا الكتاب هو إعطاء فكرة عن هذا الدور، فقد رأينا كيف يمكننا من خلال النظريات الفيزيائية تمثيل العالم الذي يحيط بنا، وكيف أن الشواش يحد من هذا التحكم الفكري للعالم، لقد رأينا أن تقديراً

صحيحاً للمصادفة وللتنبؤية هو شيءٌ مهم إن كان على مستوى الحياة اليومية أم على مستوى التاريخ، كما أدخلنا الأنطروبية التي تقيس كمية المصادفة الناتجة عن الشواشية الجزيئية في لتر من الماء، وألقينا نظرة على مسائل التعقيد، ورأينا أنه من الممكن أن يكون من الصعب للغاية الحصول على المعلومات المفيدة، ووجدنا المصادفة حتى في خواص الأعداد الصحيحة**3,2,1**.

لنلق الآن نظرة على هؤلاء الذين يصنعون العلم.

بعد مناقشة مع عدد من الزملاء، توصلت إلى نتيجة أن هناك مجموعتان كبيرتان من الفيزيائيين الذي هم من جيلي، بعضهم من اللذين طوروا ميلهم العلمي بالقيام بأعمال الكيمياء المسلية عندما كانوا صغاراً، والبعض مجذوباً بالكهرباء الميكانيك، كانوا يتسلون بتفكيك أجهزة الراديو والساعات المنبهة، وكنت أنا كيميائياً بحزم. عندما أقابل زميلاً له نفس الميول، قد يحصل أننا قد نمضي ساعة ونحن نتذكر ونقارن ذكريات "تجاربنا" الكيميائية المجنونة، مثل تحضير النتروغليسرين أو مفرقعات الزئبق، أو بغلي أسيد الكبريت في أنبوب من البيركس (لا أنصح بهذه التجربة بصورة خاصة). لقد سألت مرة الفيزيائي الأميركي جون ويلر إن كان ينتسب إلى النوعية الكيميائية أم إلى الإلكتروميكانيكية، وكان جوابه بأنه ينتسب "لكليهما"، والتفتت زوجته التي كانت حاضرة ممسكة بيده وقائلة "أرنا إصبعك يا جوني"، وكان على جوني أن يرينا إصبعه

الذي كان ينقصه قطعة صغيرة على عقب "تجربة مسلية" في صغره. بينما أخبرني الفيزيائي موري جيلمان العكس، فهو لم يجر أبداً أي تجربة من "التجارب المسلية"، ولكنه بدلاً من ذلك قرأ الكثير من الخيال العلمي.

بسبب مشاكل المخدرات والإرهاب، أصبح من الصعب الحصول على المواد اللازمة للكيمياء المسلية، كما فُقِد الاهتمام بتفكيك أجهزة الراديو والساعات المنبهة بسبب التصغير الإلكتروني (لم يعد هناك شيئاً كثيراً للرؤية). يستمتع الآن علماء المستقبل بالحواسيب، مما يستتبع ظهور نوع جديد ومختلف من الفيزيائيين، ومع ذلك وفي كل الحالات فإن مهنة الفيزيائي تبدأ من نوع من الاندهاش، والذي هو بدون شك من أصول سحرية في حالة الكيمياء، ومن أصول أكثر منطقية في حالة الأجهزة الكهربائية والميكانيكية، والحواسيب. أدع جانباً حالة الذين يجدون أنفسهم "يقومون بالأبحاث" للحصول على تكاليف الحياة واللذين قد يفضلوا مشاهدة مباراة على التلفاز إذا كان لهم الخيار.

الرياضيون كما الفيزيائيون مدفوعون بفتنةٍ قوية، فالبحث الرياضي صعب، ومن جهة أخرى مُجزِ وشاق فكرياً، ولا يمارس دون دافع داخلي قوي.

ما هو مصدر هذا الدفع، هذا الافتتان، الذي يعمل كمحرك لنشاط الفيزيائيين والرياضيين، وبدون شك لدى البحاثة في الفروع

الأخرى للعلم؟ يقترح التحليل النفسي أنه الدافع الجنسي. تبدأ في التساؤل من أين يأتي الأطفال، ثم فجأة تجد نفسك تحضر النتروغلسرين أو تحل معادلات تفاضلية. هذا الشرح مسخطٌ قليلاً، مما يعني أنه صحيح بشكل أساسي، ولكن إذا كان الفضول الجنسي هو في أصل العلم، فإن شيئاً آخر أساسي يضاف إليه: وهو أن العالم ممكن الإدراك. إذا تناولنا مسألة العلم من الزاوية النفسية المحضة (أكانت من زاوية التحليل النفسي، أم من زاوية علم الأعصاب) نبقى عميٌ عن مفهومية الرياضيات وعن "لا معقولية فعَّالية الرياضيات في العلوم الطبيعية". بعض الإحصائيين في العلوم الطرية يظهر وكأنهم يشاركون هذا العمى، ولكن الرياضيين والفيزيائيين بمجموعهم يُقدّرون أنهم يواجهون حقيقة خارجية لها قوانينها الخاصة، حقيقة تتجاوز قواعد علم النفس، حقيقة غريبة مدهشة، وبأحد المعاني، جميلة أيضاً.

و هكذا، تحضرت لكي أعطيك وصفاً مؤثراً للعمل العظيم الذي يقوم به العالم بحل أسرار العالم... ولكنني أرى أنك لا تسمح لي بذلك، تريد أن أكلمك عن أوديب الذي بحله سر أبي الهول، أطلق سلسلة من الحوادث المأساوية والتراجيدية لدرجة أنها شغلت مؤلفي التراجيديا والمحللين النفسين للثلاث آلاف سنة التالية. يبدأ المشتغلون بالعلم أيضاً بحل الأسرار، ثم يطلقون إصبعاً صغيراً. ثم ربما يطلقون الكوكب الأرضي كله، ألا يجب أن يكون تصرف العلم أكثر مسؤولية؟

الجواب على هذا السؤال واضح: العلم لا أخلاق له على الإطلاق ولا مسؤولية له بتاتاً. يتصرف المشتغلون بالعلم بشكلٍ فردي، حسب ما يملكونه (أو لا يملكونه) من حس بالمسؤولية الأخلاقية، ولكنهم يتصرفون كبشر، وليس كممثلين للعلم. لنأخذ مثلاً ما كان يدعى سابقاً الطبيعة، والذي ليس إلا بيئتنا التي هي في طريقها للتحول إلى صندوق قمامة، هل هذا خطأ العلم؟ يمكن للعلم في الواقع أن يساعد على تدمير الطبيعة، ولكنه أيضاً يمكنه أن يساعد على حماية البيئة أو يمكنه قياس درجة التلوث. القرارات كلها إنسانية، أما العلم فإنه يجيب عن أسئلة (على الأقل من وقت لآخر)، ولكنه لا يأخذ قرارات، البشر هم من يأخذون القرارات (على الأقل من وقت لآخر).

من الصعب الحكم أي الخيارات هي فعلاً مفتوحة أمام الإنسان، هل يوم القيامة غداً؟ أو هل يمكن للإنسان أن يتابع مسعاه بدون نهاية؟ الدماغ الذي نستعمله هو نفس دماغ أجدادنا في العصر الحجري، ولقد أظهر مرونةً مدهشة، فبدلاً من الجري على الأقدام والصيد بحربة، يقود الإنسان الحالي سيارة ويبيع شهادات تأمين، وما لم تحدث مصيبة قريباً سيكون هناك تغييرات أخرى وسيكون هناك تقدم آخر. بالنسبة لعددٍ من الأعمال التقنية، أصبحت أدمغتنا - التي تعود إلى العصر الباليوليتي - باليةً، وسيتم الاستعاضة عنها بآلاتٍ أكثر سرعة وأكثر قوة وأكثر وثوقية. سيتقدم العلم ليساعد آلياتنا العتيقة للنسخ الوراثي، متحاشياً كل أنواع الأمراض المخيفة، ولن يمكننا أن نقول:

لا. ولأسباب اجتماعية لم يعد لدينا الخيار أن نرفض كل هذه التحسينات العظيمة، ولكن هل يمكن للإنسانية أن تبقى على قيد الحياة رغم التغيرات التي لا يمكن تحاشي القيام بها بالنسبة للبيئة الفيزيائية والثقافية؟ إننا لا ندري.

الآن وكما في الماضي يبقى الغموض الذي يكتنف مستقبلنا دون كشف، ونحن لا نعرف فيما إذا كانت الإنسانية تسير إلى مستقبل أنبل، أو إلى تدمير ذاتي حتمي.

الفصل السابع والعشرون

مـلاحظـات

1 - المصادفة:

1-1 نظرية الألوان الأربع:

لدينا خريطة جغرافية مرسومة على مستوٍ أو على كرة. لنفرض أنه لايوجد أية بحارٍ على هذه الخريطة. نريد أن نلون هذه الخريطة بحيث أن يكون لكل دولتين متجاورتين لهما حدود مشتركة لونان مختلفان (سنتسامح بإمكانية استخدام نفس اللون في حالة كان للدولتين عدد منته من النقاط الحدودية المشتركة)، كم نحتاج من الألوان للقيام بهذه المهمة؟ هذا ما تخبرنا به نظرية الألوان الأربع.

يعود الفضل في حل هذه المعضلة إلى كينيث أبل وولفكانك هاكن، والمقالات العلمية التقنية عن الحل هي:

K.Appel, W.Haken and J.Koch , Every planar graph is four colorable، "كل خريطة مستوية قابلة للتلوين بأربع" ، القسم الأول : التفنيد Part I: Discharging, Illinois J. Math, 21,429-490 (1977)، القسم الثاني: قابلية الاختزال Part II: Reducibility, Illinois J. Math, 21,491-567 (1977).

من أجل المقالات الأقل تقنيةً يمكنك الإطلاع على: K.Appel, W.Haken, The solution of four-color-map problem Scientific American October 1977,

K.Appel, W.Haken, The ؛"الحل الرباعي الألوان لمسألة الخريطة" ، pp. 108-121
" four color proof suffices, The Mathematical Intelligencer 8, 10-20 (1986)
ملاحق برهان الألوان الأربع".

هل ستحل الحواسيب مكان الرياضيين خلال الخمسين أو الخمسمائة سنة القادمة؟ يبقى السؤال مفتوحاً، ولا يبدو أن من الممكن إعطاؤه جواباً جدياً. سأضيف بأنني لست من المتحمسين أبداً لفكرة استبدال الذكاء الإنساني بالذكاء الاصطناعي. يبقى أنّ السؤال سيظل يُطرح، وأنّ الموقف النبيل النافي (من قبيل :" أنا مقتنع تماماً بأن الآلات لن تستطيع أبداً أن تحل مكان ذكاء الإنسان") يفتقر إلى الفهم الجيد.

1-2 يبدو أن مهمة تصنيف الزمر المنتهية استدعت الكثير من الحسابات بواسطة الحاسوب، إضافةً إلى وقتٍ كبير من العمل من قبل الرياضيين. للحصول على مقدمة مختصرة عن المسألة يمكنك العودة ا.: J.H.Conway "Monsters and moonshine" The mathematical intelligencer 2,165-171(1980.

1-3 تعود سيرة حياة نيوتن الموثقة إلى كتاب: Westfall, *Never at rest* ، "دون راحة أبداً" من منشورات Cambridge University Press, Cambridge 1980. يثير تنوع اهتمامات نيوتن الدهشة والإعجاب، من جهة هنالك النتائج المهمة التي حصل عليها في الرياضيات والفيزياء، ومن جهة أخرى هنالك التنبؤات المشكوك بها (بحسب أحكامنا الحالية) حول الخيمياء والتاريخ والأديان. لقد حاولوا منع الإنتاج الفكري لنيوتن، وادّعوا بأن جزءاً منه فقط هو الجيد بينما الباقي لايستحق سوى النسيان، لكننا إذا أردنا أن نفهم السيرورة الإبداعية لدى نيوتن، لا يمكننا أن نترك جانباً رؤاه المشكوك بها، فقد كانت أبحاثه حول الوحي والخيمياء لا تقل أهميةً عن أبحاثه حول الجاذبية أو حول الحساب التفاضلي في رحلة أمله لفهم الكون، ويبقى لدينا الكثير لنفهمه حول الطريقة التي كان

يعمل وفقها فكر نيوتن. الحقيقة التي تظهر عبر كتاب ويستفول Westfall هي أن نيوتن لم يكن لديه أي نوع من حس الدعابة.

1-4 للحصول على مقدمة عن مسائل الجينات الجزيئية يمكنك الاطلاع على الكتاب الكلاسيكي: "المصادفة والضرورة" J.Monod *"Le hasard et la necessité"*، يتمم هذا العمل عملاً استثنائياً من التنظيف الفلسفي، الذي ليس باستطاعتنا إلا الإعجاب به، حتى لو كنا لا نتبنى جميع مواقف المؤلف (البعض يحكم على مونو J.Monod بكونه كثير التشاؤم، بينما أراه متفائلاً جداً في نظرته حول إمكانية حصول التحالف الجديد*).

2 - **رياضيات وفيزياء:**

2-1 الرياضيون هم مجموعة متغايرة heterogeneous كما هو طبيعي. بعضهم يحب المجابهة المباشرة للمشاكل، ويعزون نجاحهم لقدراتهم التقنية العالية. البعض الآخر يدور حول المسألة إلى أن يجد حيلة دقيقة تمكنه من وضع حل سهل (إلا أنه لا يوجد دائماً هكذا حيل)، وبالتالي ليس الجميع متشابهون، وبعضهم لا يتفق أبداً مع فكرتنا عن الرياضيين. لكن غالباً ما يوجد شعور عائلي ليس فقط بين الرياضيين، بل بشكلٍ أعم بين العلماء المحترفين. إن التشابه هو تشابه فكري، وأيضاً فيزيائي، فقد وجدت أكثر من مرة الطريق إلى اجتماعٍ علمي بتتبع أحد المارين في الطريق والذي كان يوحي بأنه زميل (غير معروف، بالطبع)، والواقع أني لست الوحيد الذي لاحظ هذا النوع من الحوادث.

2-2 عُد إلى الفصول 22 , 23. هاك فكرة عن نظرية اللاتمامية لغودل: في إطار القضايا الأساسية المقبولة عموماً حول الأعداد الطبيعية 3,2,1... يبين غودل أن هنالك قضايا لا يمكننا البرهان على صحتها ولا على خطئها: إنها غير قابلة

---

* الحلف الجديد: أحد أهم كتب العالم إيليا بريغوجين الحائز على نوبل في الكيمياء عام 1977، وستصدر ترجمته من قبلنا قريباً- المترجم.

للتأكيد. إذا زدنا من عدد القضايا الأساسية، سيظل هنالك دوماً مجموعة غير قابلة للتأكيد. لقد قلنا أن طول البراهين الرياضية يجعل الرياضيات ممتعة (حتى البراهين الأكثر قصراً لبعض النظريات هي براهين طويلة)، إلا أن من البديهي أن يبحث الرياضيون عن براهين موجزة وأنيقة. إن الحيل التي تسمح ببرهان موجزٍ جداً لنتيجة معينة كنا نظنها صعبة، تنتج رضىً وخيبة في آن واحد (لأن النتيجة تم اختزالها في النهاية في بديهية).

2-3 انظر بوانكاريه "الابتداع الرياضي" الفصل الثالث من كتاب "العلم والمنهج" :

H.Poincare <<*L'invention mathemtique*>> ch3 *"Science et Méthode"* Ernest Falmmarion,Paris,1908

و انظر أيضاً في كتاب هادامار "نفسانية الإبداع في الحقل الرياضي"

J.Hadamard, *"The psychology of invention in the mathematical field"*, Princeton University Press, Princeton 1945

لقد أعطى بوانكاريه مثالاً لمسألة كان قد توقف عن التفكير فيها بشكلٍ واعٍ، وقد ظهر له حلها فجأةً وبشكل واضحٍ تماماً، لقد كان متأكداً من أن عملاً لا واعٍ *inconscient* قد جرى. سيستدعي هذا العمل في وقتٍ لاحق ما أسماه فرويد "سابق الوعي" *préconscient* أكثر من استدعائه للاوعي العميق *inconscient profond*، ولن تشرح لنا تسميته وتمييزه بعبارة "سابق الوعي" حقيقة ما يحدث فعلاً. إن دور اللاوعي (أو دور "سابق الوعي" *préconscient*) معروف، إنني أفكر بالكثير ممن يعملون في البحث العلمي، إلا أن ما ينقصنا هو فهمٌ حقيقي لعمليات الاكتشاف، الواعية أو اللاواعية.

2-4 هاك مقتطفات من كتاب Saggiatore لـ غاليله: "لقد كُتبت الفلسفة في هذا الكتاب الكبير المفتوح دائماً أمام أعيننا (ما أعنيه هو الكون)، لكن لا يمكننا فهم هذا الكتاب إلا إذا تعلمنا اللغة، وتعرفنا إلى الحروف التي كُتب بها. لقد كُتب بلغةٍ رياضية، والحروف في هذه اللغة هي: المثلثات والدوائر وجميع الأشكال الهندسية...."

5-2 يمكن للرياضيات التابعة لنظرية فيزيائية أن تذهب أبعد من الكميات المعرّفة عملياتياً، وأن تُدخل أغراضاً غير مشاهدة مباشرةً، ولا حتى من حيث المبدأ. إن عملية إدخال عناصر غير قابلة للملاحظة هي مسألة حساسة، ومن الممكن محاولة رفضها لأسباب فلسفية. ما يُلاحظ أن هذا الموقف الفلسفي المسبق هو فكرة سيئة، إلا في بعض الحالات الخاصة. وهكذا اقترح الفيزيائي جيوفري تشو في نهاية سنوات الخمسينات أن يركز فيزيائيو الجزيئات اهتمامهم على عنصر رياضي المسمى بـ المصفوفة S، وهو عنصر قريب جداً من الكميات المُقاسة تجريبياً. كان من الواجب على العكس تناسي الحقول الكوانتية غير القابلة للملاحظة.

كان من الممكن أن تكون فكرة تشو منطقية جداً، إلا أن الوقائع بينت خطأها: فالحقول الكوانتية تبقى أداةً لا يمكن الاستغناء عنها في دراسة فيزياء الجسيمات.

3-احتمالات:

1-3 يعود الفضل في وضع الأسس الرياضية لحساب الاحتمالات إلى كولوموغوروف (نفس الشخص الذي ناقشنا في الفصل الثاني نظريته حول نفسية الرياضيين، وصاحب نظرية الاضطراب التي ناقشناها لاحقاً). المرجع الكلاسيكي هو كتاب:

A.N.Kolmogorov *"Grundbergriffe der Wahrs-cheinlichkeitsrechnung"* Erg. Math., Springer, Berlin, 1933

2-3 نؤكد على أهمية إعطاء تعريف فيزيائي للاستقلالية. بالطبع القول بأن "حادثتان هما مستقلتان إذا لم يوجد أي شيء لدى أياً منها يتعلق بالآخر"، ليس بتعريف عملياتي للاستقلالية. إن من الأفضل أن نذكر بأنه مبدأ ميتافيزيقي عام ذلك الذي يقترح تعاريف عملياتية في حالات خاصة، (يمكننا مثلاً أن نقوم بهز حجر الزهر جيداً بين رميتين متتاليتين لنعتبرهما مستقلتين).

يمكن اختبار صلاحية التعاريف العملياتية للاستقلال بالتحقق من نتائج هذه التعاريف.

لكن لماذا لا نستخدم التعريف الرياضي للاستقلال، (يعني بالتحديد القضية (3)، ونتحقق منه بوساطة اختبارات إحصائية؟ من حيث المبدأ، هذه طريقة مرضية جداً لتمثيل الأشياء، وهي المستخدمة في المقررات ولكن ليس في الواقع العملي، فالاختبارات الإحصائية ثقيلة وفي كثير من الأحيان غير مقنعة. وهكذا فإننا نبدأ في الحياة العملية بحزر أن الحوادث قيد البحث هي حوادث مستقلة لأنه لا علاقة لأحدها بالآخر، ومن ثم نحاول رؤية ما إذا كان يوجد طريقة تهدم هذا الاستقلال، ولا نلجأ للاختبارات الإحصائية إلا كحل أخير.

4-اليانصيب وكشف الطالع:

1-4 في الحقيقة، إن شراء ورقة يانصيب من حين لآخر قد لا يكون غير منطقي في حال كنا تشعر بلذة حقيقية. تناقش المقالات الاقتصادية منطق الأشياء (وتناقش أيضاً لماذا يكون من الجيد التوقيع على بعض عقود التأمين، حتى لو كانت الشركات تجني أرباحاً غير متناقصة). ما رأيناه هو أنه لا يجب أن نأمل بأن نصبح أثرياء بشراء بعض بطاقات اليانصيب.

2-4 إذا قمنا بعدد كبير N من التجارب المستقلة، ولتكن N(A) عدد التجارب التي يكون فيها الحدث Aمتحقق وN(A,B) عدد التجارب التي يكون فيها الحدث A والحدث B متحققان. إن احتمال الحدث B علماً أن الحدث A متحقق سيكون:

$$\frac{N(A, B)}{N(A)}$$

أو أيضاً: $\frac{N(A,B)}{N} / \frac{N(A)}{N}$

أي ما يساوي تقريباً : prob(A and B)/prob(A)

من المنطقي أن نضع التعريف:

$$\text{prob(B, علماً أن A متحقق)} = \frac{\text{prob(A and B)}}{\text{prob(A)}}$$

و الـذي نسميه بالاحتمال الشرطي. إذا كان A وB مستقلان، فإن العلاقة (3) تؤدي إلى أن الطرف اليساري من العلاقة السابقة يُكتب:

$$\frac{\text{prob(A)} \times \text{prob(B)}}{\text{prob(B)}} = \text{prob(A)}$$

مما يبرهن العلاقة (4).

4-3 سنناقش في هذه الملاحظة بطريقة مختصرة المسألة التالية: كيف يمكن لحالة الطقس التي ستكون هذا المساء أن تعتمد بشكلٍ حساس على موضع الزهرة قبل عدة أسابيع، ومن جهة أن تكون مستقلة إحصائياً عن هذا الموضع. لنرمز بـ x لحالة ابتدائية للمنظومة التي نحن بصددها، أي الكون، أو بشكل أدق تمثيلاً للكون، موصفين من بين عدة أشياء، موضع الزهرة والوقت عندكم. إذا كانت الحالة الابتدائية x توافق حالة النظام قبل عدة أسابيع فإن الحالة في هذا المساء ستوصف بـ $f^t x$. وهكذا نكون قد رمزنا بـ f^t مؤثر التطور الزمني؛ إنه تحويل في الفضاء الشعاعي لحالات النظام الذي لدينا، والذي يوافق التطور منذ عدة أسابيع حتى مساء يومنا هذا.لدينا المجموعة A من الحالات الابتدائية الممكنة، وفي الواقع لا يمكننا معرفة الشروط الابتدائية لنظامنا بدقة تامة، وسنقبل هنا بأنه لا يمكننا التمييز بين الحالات الابتدائية في المجموعة A، (ولتبسيط الأمور يمكننا أن نفرض أن الموقع الابتدائي للزهرة هو المعامل الوحيد غير المعروف بدقة تامة). إن الحالات الممكنة للطقس هذا المساء توصّف بكل نقاط المجموعة $f^t A$، وبسبب ظاهرة الاعتماد الحساس على الشروط الابتدائية

التي سنناقشها في فصول أخرى، فإن المجموعة f^tA لن تبقى صغيرة (بعكس المجموعة A)، وستغطي جميع الإمكانيات لحالة الطقس هذا المساء. لتكن B مجموعة الحالات التي يكون الطقس فيها هذا المساء ماطراً، إن جزءاً من f^tA هو محتوىً في B، والجزء الآخر خارجها، وإن تأثير الزهرة منذ عدة أسابيع يمنعنا من تأكيد إذا ما كانت ستمطر هذا المساء أم لا. إن حالة النظام التي يكون فيها الطقس ماطراً عندكم هذا المساء والتي تتوافق مع ما نعرفه عن حالة الطقس منذ عدة أسابيع هي نقاط التقاطع $f^tA \cap B$، ماذا يمكننا أن نقول عن هذا التقاطع؟

للسير في مناقشتنا قدماً، سوف نستخدم التابع التالي:

يوجد للكثير من التوابع الزمنية قياسٌ للاحتمال الطبيعي m لا يتغير خلال التطور الزمني ويوصف احتمالات الأحداث المختلفة، فمثلاً $m(f^tAf)=m(A)$ هو احتمال الحدث A مترافقاً بشرطنا الابتدائي. بالاضافة إلى ذلك فإن $m((f^tA)\cap B)$ هو احتمال حصول الحدث A منذ عدة أسابيع وحصول الحدث B هذا المساء. وقد وُجد أنه في الكثير من الحالات ومن أجل t كبير لدينا:

$$m((f^tA)\cap B) \approx m(A)\times m(B)$$

هذه الخاصية التي تسمى مزج mélange تعني أن المجموعة f^tA ممتدة، مطويّة على نفسها، وباختصار "مرقعّة"، حيث كل جزء من هذه المجموعة ينتمي لـ B يتناسب طرداً مع قياس B (مقاساً بـ m(B)).

إذا عبرنا عن خاصية المزج بالمصطلحات الاحتمالية، نرى أنها تعطي نفس النتيجة كما لو اعتبرنا أن سقوط المطر هذا المساء وموضع الزهرة قبل عدة أسابيع هما حدثان مستقلان (إحصائياً)، (إن إمكانية أن تكون $m(A)=0$ هي مسألة تقنية يمكن حلها بالمرور إلى النهايات).

إن الشرح الذي كنت بصدده للاستقلال الإحصائي ليس برهاناً حقيقياً، وبالتالي لا يقنع الرياضيين، إننا بعيدون للأسف عن تقديم برهان رياضي

لخاصية المزج: المسألة جد صعبة، لكن ما هو رأي الفيزيائي؟ بالنسبة للفيزيائيين، فإنهم لا يتطلبون براهين دقيقة، لكنهم ينادون بأشياء أخرى، إنهم يتسألون لماذا هنالك اعتماد حساس على الشروط الابتدائية في مسألتنا المطروحة، وبدل الحديث عن بضع أسابيع يرغبون بالحصول على قيمة تقديرية أكثر دقة (سوف نتحدث عن هذا في فصول لاحقة)، كما يرغبون أن نحدد ماذا نعني بموضع كوكب الزهرة (إذا لم نكن حذرين في تعريفنا نخاطر بأن يكون موضع الزهرة مترابطاً مع الفصل، وبالتالي سيكون مترابطاً corrélé مع فصول سقوط الأمطار)، بالإضافة إلى ذلك بدل أن يحاولوا البرهنة رياضياً على خاصية المزج، سيحاولون أن يظهروا كيف أن الاستقلال الإحصائي بين سقوط المطر وموضع الزهرة يمكن أن يصبح لاغياً. يمكن أن نتخيل على سبيل المثال أن عاملاً ذكياً يتسلى بتغير حالة الطقس تبعاً لملاحظاته لكوكب الزهرة. في النهاية إذا كانت أهمية المسألة تبررها، يمكن للفيزيائيين أن يهتموا بسلسلة من الملاحظات والاختبارات الإحصائية حول استقلالية موضع الزهرة عن حالة الطقس عندنا.

تترك مناقشتنا السابقة سؤالاً - على الأقل - مفتوحاً: ماذا نعني بالعامل الذكي؟ كل ما نستطيع قوله في هذا الصدد هو أنا العامل الذكي يدخل ترابطات لم نكن لنتوقعها في حالة عدم وجوده. إذا ما تأملتم، ستجدون دون شك بأن هذا التوصيف ليس توصيفاً سيئاً للذكاء.

5 -الحتمية الكلاسيكية:

1-5 معادلة نيوتن:

لنأخذ N نقطة مادية ذات كتل $m_1,\ldots,m_N$ (أعداد موجبة)، ولها المواضع $x_1,\ldots,x_N$ (أشعة ثلاثية البعد). تكتب معادلة نيوتن على الشكل:

$$m_i \frac{d^2}{dt^2} x_i = F_i \qquad i = 1,\ldots,N$$

حيث F_i تمثل القوة المؤثرة على الكتلة رقم i. نتكلم عن معادلة نيوتن

$$F_i = \gamma \sum_{j\neq i} m_i m_j \frac{x_j - x_i}{|x_i - x_j|^3}$$

بالصيغة المفردة بالرغم من أنها تمثل 3N معادلة (لكل x_i ثلاثة مساقط). تعطى القوة التجاذبية بالعلاقة:

حيث γ هو ثابت الجاذبية، هذه هي القوة المستخدمة عند دراسة حركة الكواكب حول الشمس. إذا كانت المواضع x_i والسرعات dx_i/dt معروفة في لحظة ابتدائية معينة، يمكننا من حيث المبدأ أن نعينها عند جميع الأزمنة الأخرى انطلاقاً من معادلة نيوتن، وقد قلت أن ذلك ممكن "من حيث المبدأ" لأن وجود حل لمعادلة نيوتن ووحدانية هذا الحل ليسا مضمونين من أجل جميع الشروط الابتدائية، بالإضافة إلى ذلك عندما تكون N مساوية لـ 3 أو تزيد على ذلك لا يمكن الحصول على الحلول على شكل تحليلي مباشر، وتصبح دراستها حرجةً جداً.

2-5 ارجع إلى كتاب لابلاس "مقالات فلسفية حول الاحتمالات" من منشورات كورسيه، باريس 1841.

P.S.Laplace, *Essai philosophique sur les probabilité,* Courcier, Paris,1841.

3-5 ارجع إلى المقالات: ر.توم "*Halte au hasard, silence au bruit, Mort aux parasites*" "لنوقف المصادفة، سكوت الضجة، الموت للطفيليين"؛ إدغار موران، "ماوراء الحتمية: حوار النظام والعشوائية"؛ إيليا بريغوجين، "القانون، التاريخ و..التخلي"؛ نشرت هذه المقالات في البداية في مجلة Le Débat النقاش عام 1980 (العدد 3 و6)، وقد حذف توم العنوان الفرعي "الموت للطفيليين" " Mort aux parasites" من النسخة المطبوعة لمقالته، وقد جمعت هذه المساهمات بالإضافة إلى مقالات أخرى في العمل الجماعي "نزاع الحتمية، فلسفة العلم اليوم" *Querelle du*

من منشورات غاليمارد *déterminisme, Philosophie de la science d'aujourd'hui,* Gallimard 1990.

4-5 مقالة شرودينغر "اللاحتمية والإرادة الحرة" E.Schrodinger, *Indeterminisme and free will,* Nature, July 4,1936, pp. 13-14، أعيد نشر هذه المقالة في E.Schrodinger, *Gesammelte abhandlungen, Vieweg,* Vienna 1984, vol 4,pp. 364-365

6 - ألعاب:

1-6 إن احتمال أن ترد ثلاثة أرقام متتالية بقيم محددة معطاة i, j, k هو:

$$\frac{1}{10}\times\frac{1}{10}\times\frac{1}{10}=\frac{1}{1000}$$

لأن ذلك يوافق احتمال حدوث ثلاثة أحداث مستقلة كل منها ذو احتمال 1/10، وبذلك يمكننا تطبيق القاعدة رقم (3) من الفصل الثالث. احتمالات قيم i, j, k بحيث i+j+k=2 هي أن تكون إما تساوي (1,1,0) أو (1,0,1) أو (0,1,1) أو (2,0,0) أو(0,2,0) أو (0,0,2)، وهي ستة احتمالات متطابقة، وبالتالي فإن احتمال أن تكون i+j+k=2 يمكن حسابه من العلاقة (2) من الفصل الثالث، وهو:

$$6\times\frac{1}{1000}=\frac{6}{1000}$$

2-6 نظرية Minmax:

سوف هنا نناقش مجموعة خاصة من الألعاب، وهي الألعاب المسماة بألعاب الثنائيات المنتهية ذات المجاميع الصفرية، أما لماذا نسمي اللعبة بالثنائية فذلك لوجود لاعبين A,B . تكون اللعبة باختيار اللاعب A خياراً من بين M خيار (نرمزها 1..M)، واختيار اللاعب B خياراً مستقلاً من بين N خيار (نرمزها 1..N). إن تسميتنا للعبة بالمنتهية تشير إلى أن الخيارات M, N هي خيارات منتهية. إن اختيار i من قبل اللاعب A واختيار j من قبل اللاعب B يؤدي إلى كسب اللاعب A للمبلغ K_{ij}، وإلى كسب اللاعب B للمبلغ $-K_{ij}$، إن كون اللعبة ذات مجموع

صفري يعني أن الكمية $|K_{ij}|$ التي ربحها لاعب هي نفس الكمية التي خسرها الآخر، لنفرض الآن أن اللاعبين A، B اختارا وفق الاحتمالات $p_1,....p_M$ و$q_1,...q_N$، وهكذا يكون متوسط ربح اللاعب A:

$$\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N} K_{ij}\, p_i q_j$$

بينما يكون متوسط ربح اللاعب B هو ناقص الكمية السابقة. سيختار اللاعب A لـ p_i بحيث يكون ربحه أكبر ما يمكن من أجل الخيارات الأقل تفضيلاً défavorable لـq_j من قبل اللاعب B. هذا يعطي:

$$\min_{(q_1,...q_N)}\ \max_{(p_1...p_M)}\ \sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N} K_{ij}\, p_i q_j \qquad (1)$$

الكمية الموافقة للاعب B هي:

$$\min_{(p_1...p_M)}\ \max_{(q_1,...q_N)}\ \sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N} (-K_{ij})\, p_i q_j =$$

$$-\max_{(p_1...p_M)}\ \min_{(q_1,...q_N)}\ \sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N} K_{ij}\, p_i q_j \qquad (2)$$

تقول نظرية القيم الصغرى بأن (2) تساوي ناقص (1)، أي أن:

$$\min\max \sum_i\sum_j K_{ij}\, p_i q_j = \max\min \sum_i\sum_j K_{ij}\, p_i q_j$$

في جميع هذه الصيغ نفرض دوماً أن:

$$p_1,....p_M, q_1,...q_N \geq 0 \qquad \sum_i p_i = 1, \sum_j q_j = 1$$

لنلاحظ أنه إذا لم يتبع اللاعبان A, B استراتيجيات احتمالية، ورضوا بدلاً من ذلك باستراتيجيات صافية pure فلن يكون بإمكاننا تطبيق نظرية minmax، حيث أنه بشكلٍ عام:

$$\min_j \max_i\ K_{ij} \neq \max_i \min_j\ K_{ij}$$

ما يحصل في مثل هذه الحالة هو أن أحد اللاعبين يكتشف أن في مصلحته تبني استراتيجية احتمالية.

يعود الفضل في وضع نظرية minmax إلى جون فون نيومن (ارجع إلى كتابه "نظرية الألعاب والسلوك الاقتصادي" *"Theory of games and economic behavior"* من منشورات University Press Princeton 1944).

كيف نحصل على قيمة K لاستراتيجية minmax وعلى قيم p_i، q_j والتي تعرف الاستراتيجيات الأمثلية بالنسبة للاعبين A, B ؟ يتم تحديد هذه القيم بواسطة الشروط الخطية التالية:

$$p_i \geq 0, \quad \sum_i K_{ij} p_i \leq K \quad , \qquad i = 1....M$$

$$q_j \geq 0, \quad \sum_j K_{ij} q_j \geq K \quad , \qquad j = 1....N$$

$$\sum_i p_i = \sum_j q_j = 1$$

إن إيجاد حل لجملة من المعادلات والمتراجحات الخطية هو مسألة برمجة خطية.

في الحالة الخاصة لجدول الأرباح الموضح في الفصل، نجد:

$p_1=0,\ p_2=0.45,\ p_3=0.55,\ q_1=0.6,\ q_2=0.4,\ q_3=q_4=0,\ K=3,4$

7 - الاعتماد الحساس على الشروط البدائية:

1-7 إن سرعة تزايد (المشتق الزمني) المسافة بين كرة حقيقية وكرة تخيلية يتناسب طرداً (بتقريب من الدرجة الأولى) مع الزاوية بين مساري الكرتين. وبالتالي يمكن تقدير المسافة بين الكرتين بواسطة التكامل الأسي الذي هو الآخر بدوره أسي أيضاً (بتقريب ثابت إضافي):

$$\int_0^t A e^{\alpha s} ds = \frac{A}{\alpha}(e^{\alpha t} - 1)$$

من البديهي أن فرض التصادم ليس إلا مقاربة للواقع، وحتى لو قبلنا فإن تزايد الزاوية ليس أسياً تماماً. إلا أن الحاجز الأساسي أمام هذه المقاربة هو أنه لايمكن تطبيقها إلا في حالة المسافات الصغيرة بين الكرتين.

2-7 يا.سينيا: "الأنظمة الديناميكية ذات الارتداد اللين" هذه المقالة التي نشرت بالروسية لأول مرة وكانت غارقة في التقنية، تبعها الكثير من المقالات في نفس المجال من قبل كتاب مختلفين.

8 - هادامار، دوهم، وبوانكاريه:

1-8 ج.هادامار: "السطوح ذات الانحناءات المتعاكسة والتي خطوطها أرضية"، مجلة "الرياضيات النظرية والتطبيقية" العدد 4 صفحة 27-73 (1898)، أعيد نشر هذه المقالة ضمن "أعمال جاك هادامار " من منشورات CNRS باريس. في هذه المقالة تم ذكر الملاحظة التي تنص على أنه إذا كان هنالك خطأ ما في تقدير الشروط البدائية لنظام فإنه لا يمكن التنبؤ بتصرف هذا النظام على المدى الطويل.

2-8 من الأسهل دراسة السطوح المتراصة compact ذات الانحناءات الثابتة والسالبة. إن لهذه السطوح سيئة على سطوح هادامار كونها غير قابلة للتحقيق في الفضاء الإقليدي الثلاثي البعد. تتذكرون مسلمة إقليدس التي تنص على أنه من نقطة خارج مستقيم لا يمكن رسم سوى مستقيم وحيد موازٍ لذلك المستقيم، كما تتذكرون بأنه يمكننا بناء هندسة لاإقليدية تكون فيها هذه المسلمة خاطئة، وبالتحديد فإنه في مستو لوباتشوفسكي هنالك عدة مستقيمات موازية لمستقيم وتمر من نقطة وحيدة خارج هذا المستقيم، وهكذا فإنه في مستو لوباتشوفسكي تتحرك نقطتان على مستقيمين متوازيين متباعدتان عن بعضيهما البعض.

8-3 بدوهم : "مثال على الاستنتاج الرياضي غير المستخدم أبداً" في كتابه "النظرية الفيزيائية"، منشورات Chevalier et Riviere باريس 19 ، وقد دلني رينيه توم على هذا المرجع.

8-4 هـبوانكاريه: "المصادفة" الفصل الرابع من كتابه "العلم والمنهج" (انظر الملاحظة 2 من الفصل الثاني).

8-5 حتى في غياب الاعتماد الحساس على الشروط الابتدائية، يمكن لأسباب صغيرة أن يكون لها نتائج كبيرة، ويكفي لذلك، كما يلاحظ بوانكاريه، أن ننتظر زمناً طويلاً جداً.

مثال شيق آخر هو الأنظمة التي لها حالات توازن متعددة، حيث قد يكون من الصعب التنبؤ بحالة التوازن التي سوف ينتهي إليها نظام ما، من أجل شوط ابتدائية محددة ومعروفة. هذه هي الحالة التي تتشكل عندما تكون هنالك حدود مشتركة بين مختلف أحواض التجاذب bassin d'attraction، التي تشكل عدة طويات معقدة. وهذا ما يحدث عادةً في حالة النواس المغناطيسي، الذي هو عبارة عن قطعة مغنطيسية معلقة في نهاية قضيب يتأرجح فوق عدة مغناطيسيات أخرى. إذا تركنا هكذا نواس يتأرجح، فإنه سوف يأخذ بالتأرجح بطريقة معقدة، ومن الصعب التنبؤ في أي وضع توازن سوف ينتهي بالتوقف، (بشكل عام، يوجد عدة مواضع للتوازن). للاطلاع على أشكال تمثل مجالات تجاذب ذات حدود معقدة يمكنك الرجوع إلى المقالة "حدود الأحواض الكسورية":

S.Mcdonald, C.Grebogi, E.Ott, J.Yorke, *Fractal basin boundaries*, Physica 27 D,125-153(1985)

يمكن أن يَنتج ما نسميه بالمصادفة، كما يلاحظ بوانكاريه، من فقدان تحكمنا بعضلاتنا، كما هو الحال في مثال لعبة الروليت. إن لعبة الطرة والنقش مشابهة، فبعض الأشخاص المتدربين بشكل جيد قادرين على أن يحصلوا على نتائج مقررة سلفاً.

9 - **الاضطراب:حالات:**

9-1 أدين بقصة "الدكتور الجاذبي الصغير" لجورج أوهلينبك George Uhlenbeck، أما بالنسبة للوقائع الأخرى المتعلقة بالأستاذ "تيوفيل دو دندر" فأدين بها لمارسيل ديمور Marcel Demeur.

9-2 نستطيع باستجاوبنا للعلماء تجميع بعض المعطيات حول الإدهاش الذي يغمر عملهم البحثي، وبالرغم من أن تفسير هذه المعطيات سيكون حساساً، إلا أنه قد يسمح بفهمٍ أفضل لنفسانية عملية الكشف، وسيكون من المثير دراسة حالة العلماء الذين وصلوا حد الجنون، بسبب الشفافية العالية التي تتمتع بها دوافعهم، (مع الأسف يفقد معظم الناس اهتمامهم بالعلم في وقت مبكر، ويبقون في ما عدا ذلك عاديين لدرجة ميؤسة). لكنني تعرفت إلى مثال معاكس استثنائي لحالتنا تلك، مثال لفيزيائي كان تقيمه ضمن مجموعته متدنياً بشكلٍ ملحوظ، ومع ذلك أصبح إنساناً عظيماً ذو أفكارٍ عميقة عندما تكلم حول العلم.

9-3 ارجع إلى المقالة: "حول حركة سائل لزج يملئ الفراغ":

J.Leray, *Sur Le movement d'un fluid visiceuex emplissant l'espace*, Acte, Math. 63, 193-248(1834).

9-4 بوانكاريه، "نظرية الدوارات" منشورات كاريه ونود.

H.Poincaré, *Théorie des tourbuillons*, Carré et Naud, Paris1982

9-5 سفيتانوفي، "الشمولية في الشواش"، منشورات أدام هيلغر. هاو باي لين، "الشواش" منشورات عالم العلم.

P.Cvitanovi, *Universality of Chaos*, Adam Hilger, Pristol, 1984; Hao Bai-Lin, Chaos, World Scientific, Singapore, 1984 ou Chaos II 1990;

9-6 المقالات الأصلية هي: لاندو: "حول مسألة الاضطراب" (بالروسية) مجلة Dokl,Akad. Nauk sssr 44,8, 339-342(1944)، هوبف: "مثال رياضي يُظهر خواص الاضطراب" مجلة Commun. Pure appl. Math. 1, 303-322(1948). نشرت أفكار لاندو بالإنكليزية في كتاب "ميكانيك السوائل" تأليف لاندو ولفشيتز من منشورات Pergamon Press, Oxford, 1959، وقد صدرت بالفرنسية الطبعة

الأحدث من الكتاب عام 1990 ، وتناقش الجواذب الغريبة وتأخذ بعين الاعتبار الأفكار الجديدة حول الاضطراب.

7-9 كوهن:"بنية الثورات العلمية"* ، منشورات جامعة شيكاغو.

T.S.Kuhn, *The Structure Of Scientific Revolution,2nd*.,University of Chicago,1970

لست ممن يقبلون كل أفكار كوهن، خاصةً أنني أرى تحليله غير قابل للتطبيق في حالة الرياضيات البحتة، بالرغم من ذلك تظل فكرة "النموذج" قابلة للتطبيق على المفاهيم الفيزيائية للحالات وللشواش.

8-9 مقالة "الأنظمة الديناميكية القابلة للاشتقاق" Smale, *Differentiable Dynamical Systems*, Bull. Amer. Math. Soc. 73,747-817(1967)

10-الاضطراب، الجواذب الغريبة:

1-10 إذا ما استخدمنا الترميز المستخدم في الملاحظة 1 من الفصل 3، فإن الشرط الابتدائيx يقود في نهاية الزمن t إلى النقطة f^tx. إذا استبدلنا x بـ $x+\delta x$ فإن f^tx ستصبح $f^tx+\delta f^tx$. نقول أن هنالك اعتماد حساس على الشروط الابتدائية عندما يكون $\delta f^tx=(\partial f^tx/\partial x)\delta x$ تزداد أسياً مع الزمن t. وبشكلٍ أدق يكون لدينا اعتماد حساس على الشروط الابتدائية عندما تتزايد طويلة norme مصفوفة المشتقات الجزئية $\partial f^tx/\partial x$ أسياً مع الزمن t. لندرس الآن حركة موصفة بـ k زاوية قيمها $\theta_k,...,\theta_1$ الابتدائية والتي تصبح قيمها بعد مرور زمن t:

$$\theta_k+\omega_k t,...,\theta_1+\omega_1 t(\mathrm{mod}2\pi)$$

إذا كتبنا :

$$f^t(\theta_1,..,\theta_k)=(\theta_1+\omega_1 t,.....,\theta_k+\omega_k t) \qquad (1)$$

فإننا نحصل على:

$$\delta f^t(\theta_1,..,\theta_k)=(\delta\theta_1,.....,\delta\theta_k) \qquad (2)$$

---

* ظهرت الترجمة العربية لهذا الكتاب تحت عنوان "بنية الثورات العلمية" من منشورات سلسلة المعرفة. (المترجم)

إن الطرف اليميني مستقل عن T، وبالتالي ليس لدينا اعتماد حساس على الشروط الابتدائية، إن التطورات الزمنية التي يمكن صياغتها بالمعادلة (1) عبر إجراء تغير متحولات تدعى بشبه الدورية quasi périodique ولا تظهر اعتماداً حساساً على الشروط الابتدائية.إن تغير المتحولات الذي تكلمنا عنه هو عملية توسيط بـ k زاوية، وتوافق تراكب k نمط. إن المجموعة التي يمكن توسيطها paraméterisé بـ k زاوية هي (k-حلقة) k-tore أو حلقة بـ k بعد (أي أنها نتاج لـ k دائرة).

10-2 مقالة "الجريان اللادوري الحتمي" E.N.Lorenz, *Deterministic nonperiodic flow*, J.Atoms. Sci. 20,130-141(1963).

10-3 مقالة "حول طبيعة الاضطراب" D.Ruelle F.Takens, *On the nature of turbulence*, Commun. Math. Phys. 20, 167-192(1971); 23, 343-344 (1971)

10-4 ماندلبروت: "الأجسام الكسورية"، منشورات فلامريون M.Mandelbrot, *Les Objets Fractals*, Flammarion, Paris, 1975، وقد صدرت النسخة الإنكليزية عام 1977 بعنوان *The fractal geometry of nature*. لقد جذب ماندلبروت اهتمام العالم بإصرار نحو الحضور الكلي للأشكال الكسورية formes fractales من بين الأجسام الطبيعية، ولكن ما زال ينقصنا فهم السيرورات التي تولد بنىً كسورية stucture fractales.

11-العشوائية: مفهوم جديد

11-1 مقالة "الانتقال إلى الاضطراب لسائل مضغوط"

J.B. McLaughlin, P.C. Martin , *Transition to turbulence of a statically stressed fluid*, Phys. Rev. Lett. 33, 1189-1192(1974);

مقالة "انبعاث الاضطراب في سائل دوار".

J.P. Gollub, H.L. Swinney, *Onset of turbulence in a rotating fluid*, Phys. Rev. Lett. 35, 927-930(1975)

2-11 مقالة "الدور الثالث يستدعي الشواش". T.Li and J.A.Yorke, *Period three implies chaos*, Amer. Math. Monthly 82, 985-992(1975)، هذه المقالة المكتوبة بطريقة جميلة توضح أنه من أجل صف من التطبيقات من قطعة مستقيمة إلى القطعة نفسها، فإن وجود نقطة ذات دور يساوي 3 يستدعي وجود نقط دورية لها جميع الأدوار الأخرى، هذا الوضع المعقد هو ما تسميه المقالة بالشواش، هذا التعبير الذي لاقى نجاحاً استثنائياً يغطي اليوم وضعاً مختلفاً عن ذلك الذي قصده لي ويورك في مقالتهما، (إن التطور الزمني لنظام ذو عدة مدارات دورية لايعتمد دوماً بشكل حساس على الشروط الأولية والذي هو التعريف الحالي للشواش. في الواقع يمكن للمدارات الدورية المتعددة أن لاتكون واقعة على جاذب وبالتالي لن يكون لها أية علاقة مع تصرف النظام ككل). بعد بعض الوقت تعرفنا إلى أن نتائج لي ويورك ليست إلا حالة خاصة من نظرية أكثر قدماً هي نظرية ساركوفسكي، لنأخذ التطبيق الأحادي النمط Unimodal:

$f : [-1,1]\rightarrow[-1,1]$ أي أن التطبيق مستمر وأن $f(-1)=f(1)=-1$ مع كونه متزايداً على المجال $[-1,0]$ ومتناقصاً على المجال $[0,1]$. لندخل الآن علاقة الترتيب >> غير الاعتيادية بحسب الأعداد الصحيحة التالية:

$$3>>5>>7>>....>>2.3>>2.5>>2.7$$

$$2^n.3>>2^n.5>>2^n.7>>....$$

$$2^n>>....4>>2>>1$$

(بدايةً الأعداد الفردية، ثم الأعداد الفردية مضروبةً بـ 2، 4، 8،.. وأخيراً قوى 2 بترتيب متناقص). نظرية ساركوفسكي المثرية للإعجاب تنص على أن إذا كان $p>>q$ وإذا كان للتابع f نقطة دورية ترتيبها p، أي:

$$f^p x = x ,$$

$$\text{and } f^m x \neq x \quad m<p$$

فإن للتابع f نقطة دورية بدور q.من أجل p=3 نحصل على نتيجة (لي - يورك) Li and Yorke. المرجع الأصلي هو: A.N.Sarkoveskii, *Coexistence de cycles d'une application continue de la droite dans elle-meme*, Ukr. Mat. Z. 16, 61-71 (1964). تبين هذه النظرية، من بين عدة أشياء أخرى، أن من الخطأ تحقير الفحوى الرياضي للمقالات الرياضية الأوكرانية.

11-3 مقالة "الشمولية الكمية لصف من التحويلات اللاخطية".

M.J.Feigenbaum, *Quantitive universality for a class of nonlinear transformation*, J.Statist. Phys. 21, 669-706 (1979).

مقالة "برهان مدعم بالمعالجة الحاسوبية لمقولات فايغينبوم"

O.E.Lanford, *A computer–assisted proof of the Feigenbaum conjectures*, Bull. Amer. Math. Soc. 6, 427-434 (1982).

P.Collet, J.P.Eckamnn and H.Koch, *Period doubling bifuractions for familiar maps on R^n*, J.Statist. Phys. 25,1-14 (1981).

11-4 K.Pye.and B.Chance, *Sustained sinusoidal oscillations of reduced pyridine nucleotide in a cell-free extract of Saccharomyces carlsbergensis*, Proc. Nat. Acad.Sci. US 55,888-894 (1966).

11-5 مقالة "بعض التعليقات على المهتزات الكيميائية" D.Ruelle, *Some comments on chemical oscillations*, Trans. NY Acad. Sc. Ser II,35,66-71 (1973).

11-6 مقالة "تمثيل للجواذب الغريبة من دراسة تجريبية لاضطراب كيميائي" J.C.Roux, A.Rossi, S.Bachelart and C.Vidal, *Representation of a strange attractor from an experimental study of chemicl turbulence*, Phys. Letters 77 A, 391-393 (1980).

11-7 مقالة " D.Ruelle, *Large volume limit of the distribution of characteristic exponents in turbulence*, Commun. Math. Phys. 87, 287-302 (1982).

12-العشوائية: نتائج:

12-1 مقالة "الحركة المنتظمة وغير المنتظمة" لـM.Berry صفحة 16-120 في كتاب "موضوعات في الديناميك اللاخطي" منشورات American Insutitute of Physics, New York, 1978.إن الحساب الذي قام به بيري M.Berry (صفحة 59

- 96) مبني على أفكار أقدم لـ بوريل وتشيريكوف، ما هو تأثير التجاذبي لكتلة مبتعدة على تصادم كرتين مرتين؟ إذا كانت الكرتان في اللحظة الابتدائية على مسافتين مختلفتين من الكتلة، سوف تتجذبان إليها بشدتين مختلفتين، وستكون هندسة التصادم مختلفة تماماً فيما لو كانت الكتلة غير موجودة. إذا ما تتبعنا إحدى الكرتين، سوف نجد أن الاختلاف سوف يتضخم أسيّاً في الاصطدامات الناتجة (ولن يكون التكبير بنسبة 2 كما كان في مناقشتنا المبسطة في الفصل 7، ولكن سيكون بمعامل من مثل l /r حيث l هي المسافة المقطوعة من قبل إحدى الكرتين والتي نصف قطرها r)، وبعد n تصادم ستكون الزاوية بين المسار الابتدائي والمسار المعدل من درجة راديان واحد، ولن يكون للمسارين أي علاقة ببعضهما البعض.

إذا ما كانت الكتلة المبتعدة هي إلكترون على مسافة 10^{10} سنة ضوئية، وإذا كانت الكرتين المرنتين هما ذرتي أوكسجين (في ضغط ودرجة حرارة عادية)، فإن n=56، أما إذا كانت الكتلة المبتعدة هي جسم إنسان على بعد متر من طاولة بليارد، وكانت الكرتين المرنتين هما كرتي بليارد فإن n=9، هذا على الأقل ما يعطيه الميكانيك الكلاسيكي.

2-12 يُظهر الحساب الذي قام به بيري Berry والذي أشرت إليه في الملاحظة 1 أن تغيراً طفيفاً في الشروط الابتدائية سوف يغير تماماً هيكلية الاصطدام بين جزيئات الهواء في وقت قصير جداً. إن البنية الميكروية (المكبرية) للهواء، والتأرجحات التي تحدث فيه أصبحت مختلفة تماماً. تتعلق هذه التأرجحات الإحصائية بالكثافة، والسرعة، ..لعناصر حجمية صغيرة من الهواء (حيث عدد الجزيئات ليس كبيراً). يمكننا تقدير الزمن اللازم حتى يتم تضخيم هذه الاضطرابات التي نحن بصددها عبر الاعتماد الحساس على الشروط الابتدائية حتى تصل إلى المقياس الماكروي (الكبري) macroscopique (ولنقل

مقياس الـ 1cm). نستخدم في الحساب نظرية كولموغوروف حول الاضطراب، التي تقدم قيمة محددة تماماً لسعة تزايد التأرجحات. (في الواقع، إن الزمن المميز لسرعة التزايد يتناسب مع "زمن عودة" الدّوارات ذات البعد الكبري المختار). يلزمنا تقريباً دقيقتان للمرور من الاضطرابات الصغرية إلى تغيرات كبرية (ماكروية) في بنية الاضطراب [عد إلى D.Ruelle, *Microscopic fluctuations and turbulence*, Physics Letters 72 A,81-82 (1979)]

12-3 مقالة "التصرف العشوائي في النظام الشمسي". J.Wisdom, *Chaotic behavior in the solar system*, Proc. Royal Soc. London 413 A, 109-129 (1987).، لكل كويكب مدار إهليليجي حول الشمس، لكن شكل هذا المدار يتغير بشكلٍ طفيف بسبب قوة جاذبية كوكب المشتري، هذه التغيرات في الشكل هي تغيرات مهمة من أجل بعض القيم "الطنينية" resonnante لبعد الكويكب عن الشمس، أو بشكلٍ أدق لنصف القطر الأكبر للأهليلج (يحدد نصف القطر الأكبر للأهليلج زمن الدوران بحسب قانون كبلر الثالث، وعندما يكون هنالك طنين بين زمن دوران الكويكب حول الشمس وزمن دوران المشتري فإن هذا الأخير سيؤثر بقوة اضطرابية مزعجة على الكويكب، ونقول أنه يوجد حالة طنين إذا كانت نسبة الدورين أحدهما إلى الآخر تساوي لـ p/q حيث p، q أعداد صحيحة صغيرة). تظهر المحاكاة الحاسوبية أنه في حالات الطنين، تحدث تغيرات زمنية شواشية في مسار الكويكب (أي في نسبة القطر الكبير والقطر الصغير للأهليلج). عندما تكون هذه التغيرات بحيث تقطع الكويكبات مسار كوكب المشتري، فإن هذه الكويكبات تختفي بنتيجة التصادم، ويتشكل ثقب في الحزام. وهكذا تأخذ الحسابات بعين الاعتبار الوقائع المشاهدة حيث نلاحظ أن بعض القيم الطنينية توافق ثقوباً والبعض الآخر لا يوافق.

12-4 أولى المقالات حول الدراسة الكمية للشواش في البيولوجيا وفي العلوم "الطرية" شهدت تفاؤلاً متعاقباً، خصوصاً أننا ظننا أن نستطيع تحديد بعد

عدة جواذب الترافقة مع ظواهر طبيعية باستخدام طريقة مدعوة بـ -Grassberger Procaccia. ارجع إلى [P.Grassberger and I.ProcacciaPhysica D 9, 189-208(1983)] , *Measuring the strangeness of strange attractors,*

تعطي هذه الطريقة نتائج جيدة عندما نطبقها على سلاسل زمنية طويلة ز ذات نوعية جيدة، بينما تؤدي إلى نتائج عديمة القيمة في حالة السلاسل الزمنية القصيرة، ارجع إلى مقالة "الشواش الحتمي: العلم والخيال" [D.Ruelle, *Deterministic Chaos: the science and the fiction,* Proc. Royal Soc. London 427 A, 241-248(1990)]

13-اقتصاد:

1-13 تم تجميع عدة دراسات حول الاقتصاد والشواش في كتاب لـ P.W.Anderson, K.J.Arrow, and D.Pines "الاقتصاد كنظام معقد قيد التطور" The economy as an evolving complex system من منشورات Addison-Wesley, Redwood City CA,1988 . يعود أصل هذا الكتاب إلى الاجتماع الذي عُقِد في Santa Fe حيث شارك فيه اقتصاديون وفيزيائيون معاً. من المهم الإشارة إلى أن مشاركة الاقتصاديين كانت أكثر تواضعاً من مشاركة الفيزيائيين. ارجع أيضاً إلى الملاحظة 4 في الفصل 12.

14- تطور تاريخي:

1-14 ب.أرثر W.B.Arthur "الآليات المدعمة ذاتياً في الاقتصاد" Self-reinforcing mechanisms in economics صفحة 9-31 من كتاب *The economy as an evolving complex system* (ارجع إلى الملاحظة السابقة).

15-الكوانتا: الإطار المفاهيمي:

1-15 عد لكتاب فاينمان QED منشورات Princeton University Press, Princeton, 1985. إن التقديم الذي يعطيه فاينمان للميكانيك الكوانتي مختلف عن التقديم التقليدي الذي ناقشناه، لكن التقديمين من حيث المبدأ متكافآن.

15-2 لنتذكر أن العدد العقدي هو غرض رياضي له الشكل $z=x+iy$ حيث x,y هي أعداد حقيقية وحيث $i^2=i\times i=-1$.

15-3 معادلة شرودينفر:

سوف نقوم في هذه الملاحظة والملاحظتين التاليتين مرور سريع على الميكانيك الكوانتي. لنتذكر في البداية معادلة

نيوتن للميكانيك الكلاسيكي (الملاحظة 1 من الفصل 5):

$$m_i \frac{d^2}{dt^2} x_i = F_i \qquad i = 1,..., N$$

سوف نفترض وجود تابع V لـ$x_1,...x_N$ (يدعى تابع الكمون) بحيث:

$V_j= -grad_{(j)}V$

حيث $grad_{(j)}$ هو شعاع المشتقات بالنسبة لمركبات للكتلة رقم j.

في حالة قوة التجاذب فإن:

$$V(x_1,...., x_n) = -\gamma \sum_{j<k} \frac{m_j m_k}{|x_k - x_j|}$$

في الميكانيك الكوانتي هناك المطال $\psi(x_1,...x_N;t)$ لإيجاد أماكن نقاطنا

$$\frac{ih}{2\pi}\frac{\partial}{\partial t}\psi = -\frac{h^2}{8\pi^2 m}\sum_i \Delta_{(i)}\psi + V\psi$$

الـN في المواقع $x_1,...x_N$ (عند اللحظة t)، وتشكل التوابع ψ ما نسميه تابع الموجة. يمكن الحصول التطور الزمني للتابع ψ بحل معادلة شرودينفر:

حيث i هو الجذر التربيعي لـ-1، h هو ثابت بلانك، و$\Delta_{(j)}$ هو التابع اللابلاسي بالنسبة لـ x_j، أي أن $\Delta_{(j)}\psi$ هو مجموع المشتقات الجزئية من الدرجة الثانية لـ ψ بالنسبة للمركباتx_j.

لنفترض أن التكامل الثلاثي الأبعاد:

$$\int |\psi(x_1,...., x_n ; t)|^2 dx_1..dx_N = 1$$

من أجل بعض قيم t، وهكذا فإن هذه الخاصية صحيحة من أجل جميع قيم t.

4-15 بتطبيق المؤثر الخطي A على التابع φ للمتحولات $x_1,...,x_n$ نحصل على

$$(\varphi_1,\varphi_2)=\int\overline{\varphi_1}(x_1,..,x_N)\varphi_2(x_1,..,x_N)dx_1..dx_N$$

تابع جديد Aφ، بحيث أن : $A(c_1\varphi_1+c_2\varphi_2)=c_1A\varphi_1+c_2A\varphi_2$ حيث c_1,c_2 هي أعداد عقدية وφ_1, φ_2 هي توابع. لنكتب الآن:

نستخدم دوماً التوابع φ التي من أجلها (φ,φ) هو قيمة منتهية. إذا كان المؤثر A يحقق :

$$(\varphi_1,A\varphi_2)=(A\varphi_1, \varphi_2)$$

نقول أن A auto-adjoint "متلاصق-ذاتياً"، هذا النوع من المؤثرات مناسبة جداً للتوافق مع الملحوظات الفيزيائية.

على سبيل المثال الملحوظة A للمركبة الأولى x_{1j} من موقع الكتلة رقم j يُعرَّف بـ:

$$(A\varphi)(x_1,..x_n)=x_{j1}\varphi\,(x_1,..,x_n)$$

الملحوظة V_j تعبر عن سرعة الكتلة رقم j:

$$(V_j\varphi)(x_1,..,x_N)=\frac{-i}{m_j}\frac{h}{2\pi}\text{grad}_{(j)}\varphi(x_1,..,x_N)$$

يمكن الآن تعريف القيمة الوسطى لـ A بالنسبة للزمن t:

$$\langle A\rangle=(\psi\,,A\,\psi)=\int\psi(x_1,..,x_N;t)(A\psi)(x_1,..,x_N;t)dx_1..dx_N$$

حيث ψ هو تابع الموجة، (لقد قدمنا تعريف القيمة الوسطى من أجل الحالة الشعاعية المعرفة بواسطة تابع الموجة ψ. هنالك تعاريف للقيمة الوسطى أكثر عمومية بواسطة مصفوفة الكثافة، تقابل بشكل أضيق التوزيعات الاحتمالية في النظرية للكلاسيكية للاحتمالات).

5-15 إذا حققت المؤثر A المتلاصق ذاتياً (Auto-Adjoint) العلاقة $A^2=A$ ندعو A بأنها إسقاط projection، وهذه المؤثرات مناسبة جداً لتتوافق مع الحوادث البسيطة événements simple . ليكن لدينا المؤثران الخطيان A وB، جداءهما A.B هو عملية خطية تحقق $AB\varphi=A(B\varphi)$ من أجل كل تابع φ، وإذا كان AB=BA نقول أن A وB تبادليان. إذا كان A,B تبادليان فإن جداءهما A.B هو إسقاط، وهو يقابل الحدث "A وB" إذا كان A، B يمثلان الحدثين "A" و"B". أما إذا كان AB≠BA فإنه لا يوجد تعريف طبيعي للإسقاط الموافق للحدث المُشكِل problématique "A وB".

أما الحوادث المعقدة événements complexe التي توصف إطلاق déclenchement أو عدم إطلاق non-déclenchement كواشف فإنها تقابل مؤثراً متلاصقاً ذاتياً opérateur auto-adjoint ليس بالضرورة إسقاط، وهنا أيضاً نستطيع تعريف "A وB" في حالة كان A، B تبادليان.

6-15 لكي أكون نزيهاً، يجب أن أذكر أن أفكار Bell لم تكن تتفق مع تلك التي عرضتها في هذا الفصل. عد إلى كتاب "المحكي واللامحكي في الميكانيك الكوانتي":

J.S.Bell, *Speakable and unspeakable in quantum mechanics,* Cambridge Univeristy Press, Cambrifge, 1987.

7-15 عد إلى الملاحظة 8. إن تخفيض رزم الأمواج هو أحد المحاولات للصياغة الرياضية للميكانيك الكوانتي الضرورية. ليس هنالك ما يقال عن هذه المحاولات طالما أنها تتفق مع التجربة. اقترح ديفيد بوهم وروبرت غريفت طرقاً أخرى لتوسيع الإطار الرياضي للميكانيك الكوانتي (ارجع إلى الكتاب الوارد في الملاحظة 6، وإلى:

Robert Griffiths, *Consistent Histories and the interpretation of quantum mecanics,* J.Statist. Phys. 36, 219-272(1984).

16- الكوانتا: تعداد الحالات:

16-1 يمكن لنقاش تقني جدي أن يضيف بعض النكهة على تحليلنا: من الممكن أن نحد تماماً الموقع ضمن المجال [0,L] وأن نحد السرعة بالمجال [-v_{max}،v_{max}] إذا كان كل من L، v_{max} قيم منتهية، (من الناحية التقنية، ذلك بسبب أن تحويل فوريه لتابع موجة ψ ذو حامل متراص support compact لا يمكن أن يكون ذو حامل متراص إلا إذا كان ψ≠0). يمكننا ترتيب الأمور بحيث نجعل احتمال أن يكون الموضع خارج المجال [0,L] أو احتمال أن تكون السرعة خارج المجال [-v_{max}،v_{max}] صغيراً جداً. يعلم الفيزيائيون أن النقاش الذي استخدمنا فيه (كما فعلنا) مستطيلات صغيرة ليس دقيقاً. في المقابل لهذا النقاش ميزة كونه سهلاً ويعطي عادةً الجواب الصحيح. بالرغم من ذلك يجب التذكير بأن الميكانيك الكوانتي ليس نظرية إحصائية مؤسسة على معادلة الارتياب لهايزنبرغ، حتى لو أعطت هذه النظرة أجوبةً صحيحة للمسائل البسيطة.

16-2 أجل N نقطة مادية متواجدة ضمن الحجم V ولها وطاقتها الحركية

$$\text{number of states} = \frac{1}{N!} S_{3N} \left(\frac{1}{h^3} V(2mE)^{3/2} \right)^N$$

الكلية لا تتجاوز E، فإن عدد الحالات يُعطى بالعبارة التالية:

هذا يشكل من جديد حجماً في فضاء الأطوار phases مقاساً بوحدة h^{3N}، ومقسماً على عـدد التباديـل. للأخـذ بعين الاعتبار عـدم التمييز بين الجزيئات (h=6.6 E-34 جول.ثا هو ثابت بلانك، S_{3N} هو حجم الكرة التي نصف قطرها 1 والموجودة في فراغ بـ3N بعد، m هو كتلة الجزيئ، هنا m=7E-27kg، $V=E\,-3m^3$، N=2.7 E 22). نأخذ E= 3NkT/2 (k=1.4 E -23 جول/درجة كلفن هو ثابت بولتومان، T هي درجة الحرارة المطلقة وهنا تساوي 300 درجة كلفن).

$$\text{numberof states} = \frac{1}{h^{3N}}\left(\frac{V}{N}\right)^{N}(2\pi\, mkT)^{3N/2}e^{5N/2}$$

$$\approx 1E5000000000000000000000$$

لقد تركنا جانباً مشاكل الكوانتم الإحصائي، فهذه المشاكل ليست أساسية بالنسبة لنقاشنا الحالي.

17-الأنطروبية:

1-17 يؤكد المبدأ الأول في الترموديناميك أن الطاقة محفوظة في جميع السيرورات، (ليكون ذلك صحيحاً يجب الأخذ بعين الاعتبار جميع أشكال الطاقة بما فيها الحرارية).

2-17 سوف نرى في الفصول القادمة (الفصل 19) الحقيقة التالية: إذا راقبنا الحالات التي يمر بها لتر من الماء طاقته الكلية أصغر أو تساوي قيمة معينة E، معظم هذه الحالات تظهر على المستوى الماكروي كلتر من الماء عند درجة حرارة معينة (محددة بـ E)، إذا كانت E_I هي طاقة لتر الماء البارد وE_{II} هي طاقة لتر من الماء الساخن، فإن معظم حالات لتري الماء ستكون لها طاقة أصغر أو تساوي E_I+E_{II} تظهر على المستوى الماكروي (الكبري) كلترين من الماء متلاصقين. صحيح أن عدد من الحالات تظهر كلتر من الماء البارد ولتر من الماء الساخن، لكننا لا نستطيع حساب إلا عدد حالات اللترين التي تكون فيها الطاقة الكلية $\leq E_I+E_{II}$

18-اللاعكوسية:

1-18 الإرغرودية: لنأخذ N ذرة من الهليوم في وعاء حجمه لتر نعتبرها نظام ميكانيكي كلاسيكي (حيث تنعكس ذرات الهليوم على جدران الوعاء، ويمكننا افتراض أن هنالك تجاذب فيما بينها). لكل ذرة من الهليوم الموضع x_i والاندفاع mv_i (حاصل جداء الكتلة بالسرعة=الاندفاع impulsion). تشكل الثنائية X المكونة من x_i, mv_i نقطة في فراغ الأطوار (phases) M لنظامنا. بعد

مرور زمن t، تُستبدل النقطة X بالنقطة f^tX التي لها نفس الطاقة الكلية التي لـ X. لندعو مجموعة النقاط X التي لها طاقة محددة E بـ الطبقة الطاقية M_E . إن حجم فراغ الأطوار (الجداء على I لـ dx_i بـ mdv_i) يولد حجماً في الطبقة الطاقية. إذا كانت A مجموعة جزئية من M_E، وكان vol A هو حجم هذه المجموعة فإن:

$$vol\ (f^tA)=vol\ A$$

إن هذا يعني أن الحجم محفوظ بمرور الزمن. إن التعبير عن ذلك يحتاج لبعض الدقة (أن تكون A قابلة للقياس). نقول عن التطور الزمني للطبقة الطاقية M_E إرغودياً إذا كان من أجل كل مجموعة جزئية J من M_E غير متغيرة invariant (أي $f^tJ=J$ من أجل كل t) لدينا بالضرورة إما $vol\ J=0$ أو $vol\ J=M_E$.

لنفترض أن التابع الزمني f^t هو إرغودي، من أجل كل الشروط الابتدائية X ومن أجل كل مجموعة جزئية A من M_E، إن الفترة الزمنية التي تكون فيها f^tX ضمن A تساوي إلى $vol\ A/vol\ M_E$ (بشكل أدق، إذا كان (X,A,T) هي الفترة الزمنية التي تقضيها f^tX ضمن A من أجل $0 < t < T$، وبالتالي:

نها $vol\ A/vol\ M_E =((X,A,T)/T)$

عندما $T \leftarrow \infty$

هذا أحد أشكال النظرية الإرغودية. وهكذا من أجل التطورات الإرغودية فإن المتوسطات الزمنية ذات علاقة بسيطة مع حجم الطبقة الطاقية، ولهذا فإن الإرغودية مهمة جداً. من المؤسف أن من الصعب جداً برهنة أن نظاماً ما هو نظام إرغودي. لقد بُرهن على الإرغودية في حالة بليارد "سينيا" المذكور في الفصل السابع، ولكن لم يتم ألبرهان عليها إلا من أجل القليل من النظم الأخرى الهامة. في حالة النظام المشكل من ذرة الهليوم، لا يبقى لدينا إلا أن نأمل أن تكون القضية الإرغودية صحيحة.

2-18 في حالة التطورات الزمنية الإرغودية نستطيع فهم اللاعكوسية كنتيجة لعودة جد طويلة المدى إلى وضع ابتدائي ماكروي أسي. لكن يمكن أن

يكون زمن العودة طويلاً جداً حتى في حالة النظم غير الإرغودية. إن الفرضية الإرغودية الضعيفة ممكن وفي بعض الأحيان ضروري لبعض النظريات الفيزيائية. لقد ذكرت في الفصل 17 أن الاعتماد الحساس على الشروط الابتدائية كان مفيداً في فهم اللاعكوسية، فكيف ذلك؟ في الحقيقة إن الاعتماد الحساس على الشروط الابتدائية ليس ضرورياً للفرضية الإرغودية، ولكنه مفيد جداً من الناحية التقنية، ويشكل الخطوة الأولى في برهان الإرغودية في حالة بليارد سينيا.

بالإضافة إلى ذلك إذا كانت السيروة الزمنية ليست إرغودية، تدفع بعض الاضطرابات أو "الضجيج" النظام من مركبة إرغوية إلى أخرى. هذا التأثير المتمثل بالاضطرابات الصغيرة (كالأثر التجاذبي لإلكترون على حدود الكون المعروفة) يتصرف بطريقة فعالة عندما يكون هنالك اعتماد حساس على الشروط الابتدائية، مما ينتج عنه أنه حتى النظم غير الإرغودية تظهر إرغودية.

بعد كل ما ذكرنا، يجب التذكير بأن بعض الأنظمة الميكانيكية ترفض التصرف بطريقة إرغودية. تقدم نظرية KAM (A.N.Kolmogorov, V.A.Arnold, J.Moser) أمثلة هامة على خرق الفرضية الإرغوية، (للاطلاع على مناقشة عامة لهذه النظرية عد لمقالة:

J.Moser, *Stable and unstable motions in dynamical systems*, Ann Math. Studies.77, PrincetonUniversity Press, Princeton, 1973)

بالإضافة إلى ذلك، تظهر المحاكاة الحاسوبية للسيرورات الزمنية لبعض الأنظمة الهامة تصرفاً غير إرغودياً.

18-3 بريغوجين، "الفيزياء، الزمن، والصيرورة" *Physique ,temps et devenir* الطبعة الثانية منشوراتMasson,Paris,1982. إن التساؤل عن كيفية ولماذا كانت بداية الكون مترافقة بأنطروبية منخفضة هو تساؤل هام، ونقاشه يستدعي أفكاراً من نظرية الانفجار الكبير Big Bang كتفسير لنشوء الكون.

4-18 إن لاتغير Invariance القوانين الفيزيائية عند تغيير الزمن لايشكل معضلة إلا من أجل قوى التجاذب الضعيفة بين الجزئيات الأساسية. بالنسبة لكل هذه التجاذبات لا تشكل عملية عكس الزمن T تناظراً دقيقاً. على العكس نظن أن العملية TCP التي تعكس الزمن أيضاً هي عملية متناظرة تماماً. في الحقيقة لا يقدّر معظم الفيزيائيون سوى الوقائع الهامة لفهم اللاعكوسية والتي يمكن ملاحظاتها على المستوى الكبري macrosocpic.

19- الميكانيك الإحصائي للتوازن:

1-19 أدين لكارين شميلا Karine Chemla بالتعرف إلى هذا المرجع:

W.Fucks and Lauter, *Exaktwissenschaftliche Musikanalyse, Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen* Nr. 1519, Westdeutscher Verlag,Koln-Opladen, 1965.

2-19 أحد وجوه المسألة قيد الدراسة هو ما نسميه اليوم بنظرية الانحرافات الكبيرة. ارجع إلى:

D.Ruelle, *Correlation Functionals*, J. Math. Phys. 6, pp.201-220 (1965);O.Landford, *Entrpoy and equilibrium states in classical statistical mechanics*, pp.1-113 in Statistical mechanics and mathematical problems, Lecture Notes in Physics Nr. 20, Springer, Berlin, 1973; R.S.Ellis, *Entropy, large deviations and* statistical mechanics, Grundlehren der Math. Wiss. 271, Springer, New York,1985.

3-19 إن القيمة العظمى لـ $S_I(E_I)+S_{II}(E_I)$ عندما يكون $E_I+E_{II}=E$ هي القيمة العظمى (بالنسبةE_I)لـ $S(E_I)+S_{II}(E-E_I)$، ويمكن الحصول على هذه القيمة بإيجادE_I التي ينعدم من أجلها المشتق بالنسبة لـ E_I، هذا يعطي:

$$S'_I(E_I)-S'_{II}(E-E_I)=0$$ ، أي أن $T_I=T_{II}$

20-الماء المغلي وأبواب الجحيم:

1-20 إذا أخذت بدلاً من الماء زجاجاً سائلاً وتركته يبرد، سوف يصبح أكثر فأكثر لزوجة حتى يتحول في النهاية إلى زجاج بارد صلب وقاس. سوف يخبرك الفيزيائيون بأن هذا الزجاج البارد ليس بالصلب العادي، بنيته الميكروية

ليست في حالة توازن، وسوف تتغير إذا ما انتظرنا وقتاً كافياً (هذا التغير ليس مهماً أبداً خلال حياة إنسان)، ما يعنيه هذا هو أن الزجاج لا يشكل جزءاً من الواقع الذي يوصّفه الميكانيك التوازن.

20-2 عد إلى كتاب دافيد رويل، "الميكانيك الإحصائي، نتائج دقيقة"
D.Ruelle, *Statistical mechanics, rigorous results*

20-3 عد إلى "نظرية الحقول، الزمر الناظمية والظواهر الحرجة"
D.J.Admit, *Field theory, the renormalization group, and critical phenomena* ,2em edition,World Scientific, Singapour, 1984.

20-4 إحدى السيرورات النموذجية لتأرجحات الخلاء الكمومية هي عملية ولادة إلكترون وبوزيترون واختفائهما بسرعة عبر عملية إعدام متبادلة. الشحنة الكهربائية محفوظة، لذلك لا يمكن لإلكترون أن يولد أو أن يختفي وحيداً، لقد تمت دراسة هكذا سيرورات في كتاب "الإلكتروديناميك الكوانتي" لفاينمان QED، حيث يعطي فاينمان في هذا الكتاب تقديماً قابلاً لأن نحيط به لهذا الجزء المدهش من الفيزياء (عد إلى الملاحظة 1 من الفصل 15).

20-5 أحد الكتب المهمة حول الثقوب السوداء هو كتاب " الثقوب السوداء: أنموذج الغشاء" K.S.Throne, R.H.Price and D.A.Macdonald, *Black holes: the membrane paradigm,* من منشورات Yale University Press, New Haven, 1986، وهو كتاب تقني مليء بالمعادلات المعقدة، إلاّ أن إيراد المعادلات بشكلٍ مباشر هو شيء مهم بالنسبة للفيزيائي الذي يرغب بمعرفة ما هو الفحوى الحقيقي للنظرية، حتى وإن لم يكن يهدف إلى أن يصبح خبيراً في هذه النظرية. يمكن الحصول على تقدمة أقرب من الفهم العام بقراءة كتاب ستيفين هوكينغ "مختصر تاريخ الزمان" S.W.Hawking, *A brief history of time*, Bantam, London, 1988، وقد ترجم هذا الكتاب إلى العربية.

21-معلومات:

1-21 بما أن فيروس السيدا هو فيروس ذو حمض ريبي، فإن الأحرف A,T,G,C ليسوا أحرفاً أصلية، بل نسخاً في هذه الأبجدية معمولة من قبل الناسخ العكسي.

2-21 من أجل مجموعة من الرسائل لها الاحتمالات $p_1, p_2, \ldots$ يعطى متوسط كمية المعلومات لرسالة بالعلاقة:

$$\text{متوسط كمية المعلومات} = -\sum_i p_i \log p_i$$

إذا كان لدينا N رسالة لكل منها الاحتمال 1/N فإن متوسط كمية المعلومات يساوي log N. في كثير من الحالات تُرجع نظرية Breiman-McMillan دراسة الرسائل التي لها احتمالات مختلفة إلى دراسة الرسائل المتساوية الاحتمالات.

3-21 مقالة شانون "نظرية رياضية للاتصالات".

C.Shannon, *A mathematical theory of communication*, Bell System Tech. J. 27, pp.379-423, 623-656 (1948).

4-21 لدراسة المعلومات المحتواة في لحن موسيقي، نحب أن نستخدم الإحصائيات الموافقة للمجموعات المكونة من 4,3,2... علامة موسيقية متتالية، لكن المجالات بين علامتين متتاليتين يقدم حداً أعلى لكمية المعلومات.

5-21 عد إلى المرجع المذكور في الملاحظة 1 من الفصل 19، بالطبع يجب مقارنة الألحان ذات نفس الطول أو تقسيمها بطول اللحن.

6-21 في كل مناقشاتنا يجب تحديد مجموعة الرسائل المسموحة، على سبيل المثال اللوحات المربعة الوحيدة اللون، (هذا الصف يحوي كمية قليلة من المعلومات لأننا نستطيع فقط تحديد أبعاد المربع ولون محدد، وأن لا يكون عدد الخيارات التي يمكن تميزها بين الألوان كبيراً). قد يكون من الصعب تحديد

مجموعة الرسائل المسموحة في حالة فن معين (مثل الرسم المجرد)، ولكننا نشعر براحة أكبر إذا كان لدينا عدداً كبيراً من الخيارات المتاحة (كما في حالة رواية) أو عدداً صغيراً (كما في حالة سوناتة موسيقية).

22-التعقيد الخوارزمي:

22-1 انظر D.S Johnson , M.R. Garey "الحواسيب والتفاعلية" من منشورات Freeman نيويورك 1979. هذا هو المرجع الأساسي حول التعقيد الخوارزمي، ونحن نتبع هنا نفس الاصطلاحات، يحتوي هذا الكتاب على مناقشة لآلة تورينغ.

22-2 لقد تم ابتداع خوارزميات فعالة للبرمجة الخطية من قبل L.G.Khachiyan، وبطريقة أكثر قابلية للتحقيق من قبل N.Karmarkar. ارجع إلى الملاحظة (2) من الفصل (6) من أجل صياغة للعبة ثنائية منتهية ذات مجموع صفري كمسألة عن البرمجة الخطية.

22-3 يعني الاختصار NP: Nondeterministic Polynomial أي "صياغة غير محددة على شكل كثير حدود". هذا يوافق الحقيقة التي سنناقشها فيما يلي، وهي أن جواباً موجباً يمكن التحقق منه خلال زمن أسي إذا زودتنا عرافة (غير محددة) بأداة جيدة. إن مسائل "كثيرات الحدود التامة" NP complets هي أيضاً مسائل صعبة: إذا استطعت أن تحلها من أجل إحدى كثيرات الحدود، ستستطيع حلها من أجل الجميع، ومن هنا يأتي توصيفها بالتامة.

22-4 للاطلاع بشكل أعمق على مسألة كأس الدوران والنظم غير المرتبة ارجع إلى:

M.Mézard and M.Virasoro, *Spin glass theory and beyond,* World scientific, Singapore, 1987 .

5-22 إن البنية الشجرية للتطور الطبيعي تشابه البنية الشجرية من الوديان لحلول Parisi لمسألة كأس الدوران (تم عرض حل Parisi في كتاب *Spin glass theory and beyond* -الملاحظة 4).هذه المقابلة تبدو على المستوى الكمي (ارجع إلى مقالة "اختبار لموديل احتمالي للنجاح التطوري":

H.Epstein and D.Ruelle, *Test of a probabilistic model of evolutionary success*, Physics Reports 184, 289-292 (1989).

23-تعقيد نظرية غودل:

1-23 لقد سمعت هذه القصة تروى من قبل R.V.Kadison.

2-23 للتوجه في أعمال فرويد، فإن الكتاب التالي مفيد جداً: "مفردات التحليل النفسي".

J.Laplanche, J.-B.Pontalis, *Vocabulaire de la Psychanalyse*, BUF, Paris,1976.

3-23 عندما نقول بأن "فرضية ما لا يمكن برهانها كما لايمكن دحضها انطلاقاً من نظام مقولات معين، إلا أنها رغم ذلك صحيحة"، ماذا يعني ذلك؟ لفهم ذلك يجب أن نفهم طبيعة الحيل التي نتلاعب بها في المنطق الرياضي، والتي نسميها بالرياضيات. يمتلك الرياضيون نظريات متعددة..A,B, كل منها مؤسس على نظام من البديهيات التي نعتقد أنها لا تؤدي إلى أي تناقض، وهكذا فإن A يمكن أن تكون تمثيلاً فرضياً لحساب الأعداد الصحيحة، وB تمثيلاً لنظرية المجموعات، ما برهن عليه غودل هو أنه لا يمكننا إثبات أن نظام الفرضيات من النوع المستخدم من قبل الرياضيين هو غير متناقض، وهكذا فإن نوعاً من الإيمان ضروري هنا، إلا أن معظم الرياضيين مقتنعون أن نظام الفرضيات لنظرية الحساب أو لنظرية المجموعات التي يستخدمونها لا يمكن أن تؤدي أبداً إلى تناقض.

23-4 عد لمقالة "نظرية للتداخل التحريضي"، مقالة "ثلاثة مقاربات لتعريف مفهوم كمية المعلومات"، مقالة "حول طول البرامج لحساب السلاسل الثنائية المنتهية":

R.J.Solomonoff, *A formal theory for inductive inference*, Inform. and Control, 7,1-22, 224-254 (1964);A.N.Kologorov, *Trois approches a' la définition du concept de quantité d'information*, Probl. Peredachi. Inform., 1, 3-11 (1965); G.J.Chaitin, On the length of *programs for computing finite binary sequences*, J.ACM, 13,547-569 (1966).

عد أيضاً لكتاب G.J.Chaitin "النظرية الخوارزمية للمعلومات" *Algorithmic Information Theory* من منشورات Cambridge University Press، 1987، وكتابه "المعلومات، العشوائية، اللاتمامية" *Information, randomness, and incompleteness* من منشورات World Scientific, Singampore, 1987 .

23-5 ارجع إلى النظرية 2 في ملحق مقالة "التعقيد الحسابي للمعلومات":

G.J.Chaitin, *Information-theoretic computational complexity*, IEEE Trans. Inform. Theory, IT-20.10-15 (1974).

هذه المقالة أعيد نشرها في كتاب "المعلومات، العشوائية، اللاتمامية" (ص 23-32) المذكور في الملاحظة السابقة.

23-6 ارجع إلى مقالة "مسألة هيلبرت العاشرة"

M.Davis, Y.Matijasevic, and J.Robinson, *Hilbert's tenth problem, Diophantine equations: positive apects of a negative solution*, pp.323-378, in *Mathematical developments arising from Hilbert problems*, Proc. Symp. Pure Math XXVII, Amer. Math. Soc., Providence, R.I., 1976.

23-7 ارجع إلى كتاب "النظرية الخوارزمية للمعلومات" المذكور في الملاحظة 4. إن متتالية شايتان Chaitin لا تصبح عشوائية إلا بعد عدد منته من الحدود.

23-8 اقترح بيير كارتيه أن فرضيات نظرية المجموعات تقود إلى تناقض، إلا أن التسلسل المنطقي الضروري لبرهان ذلك طويل جداً حتى أنه لا يجد له مكان في العالم الفيزيائي.

24-المعنى الحقيقي للجنس:

24-1 يمكننا فرض أن عدد المنحدرين من الجيل الأول لرسالة معينة يتناسب مع exp(E) (حيث E هي الرسالة)، ولنسمح بانتقال رسالة إلى رسالة أخرى بإجراء تبديل في أحرف الرسالة. إن سيئة هذا التمثيل هو أنه لا يأخذ بعين الاعتبار ديناميكية العلاقات بين رسالة ما والرسائل التي من نفس النوع أو من أنواع مختلفة (أي أنه لا يأخذ بعين الاعتبار ديناميكية السكان).

24-2 من الأسهل من الناحية الرياضية التفكير بالتبديلات النقطية (بالرغم من أن أنماطاً أخرى من التباديل مهمة جداً في عملية التطور). توافق التباديل النقطية مساراً عشوائياً في البيئة التي يوفرها التابع E. إن فرض كون المنحدرين من الجيل الأول يتناسب طرداً مع exp(E) يؤدي إلى تفضيل القيم الأعلى من E. من المعروف أن المسارات العشوائية في بيئة عشوائية بطيئة جداً، في الواقع للذهاب من تشكيلة إلى أخرى يجب المرور بعملية هبوط، والتي هي عملية قليلة الاحتمال (ارجع إلى يا.ج.سينيا: "المنحى التقاربي للمسارات العشوائية أحادية البعد في البيئات العشوائية"، Teor, Verojatn من منشورات IEE Primen عدد 27 صفحة 247-258 (1982)، E..Marinari, G.Parisi, D.Ruelle, P.Windey "حول تفسير الضجيج 1/f" من منشورات Commun. Math. Phys. 89,1-12 (1983)

24-3 إن الجنس، بالرغم من عدم كونه عالمياً، إلا أنه سائد بين الكائنات الحية. ونلاحظ التشكيلات الجينية، التي هي عملية جنسية، عند بعض أنواع البكتيريا. هذا لا يعني أنه يوجد جنسين مختلفين (إن هذا هو تحديث ليس جوهرياً، مهما ظهر لنا مهماً).

24-4 إن من المقبول عموماً كون الجنس يساعد على التطور، إلا أنه توجد أراء معاكسة لذلك. ارجع إلى L.Margulis,D.Sagan في كتابهما "أصل الجنس" من منشورات Yale University Press, New Haven 1986.

5-24 ردوكينز "الجينات الأنانية" R.Dawkins, *The Selfish Gene*, Oxford University Press, Oxford 1976 .

6-24 لقد تشكلت الأرض منذ 4,5E9 سنة، ولقد وجدنا آثاراً للحياة في صخور قديمة عمرها 3,5E9 سنة، وعلى مقياس عمر الأرض يبدو أن الحياة ظهرت باكراً ما أن سمحت بذلك البيئة الأرضية، ولنلاحظ أن التابع (رسالة)E كان مختلفاً جداً عند بداية الحياة عما أصبح عليه اليوم.

25-ذكاء:

1-25 د.مار، "رؤية" Vision، دار فريمان - نيويورك 1982

2-25 العمليات التي اهتم بها فرويد هي عمليات التي تخص الوعي.

3-25 إن النظر إلى عالمنا بمنظور ثلاثي الأبعاد هو بالتأكيد نظرة مثالية، وكذلك أن عالمنا يحوي أجساماً محدودة بسطوح. يستخدم العلماء تمثيلات أخرى، لكن هذا التمثيل بالتحديد تم تشجيعه من قبل التطور وتم لصقه داخل أدمغتنا. لقد خدمنا هذا التمثيل كثيراً في عملية البقاء، كما في عملية تطوير الهندسة وفروع علمية أخرى.

4-25 مقالة " الفعاليّة الغير منطقية للرياضيات في العلوم الطبيعية":

E.Wigner, *The unreasonable effectiveness of mathematics in the natural sciences;* Comm. pure appl. Math. 13,1-4 (1960).

26-خاتمة: العلم:

1-26 يجب ذكر كتاب مهم ويثير الفضول: "أباطرة العقل الحديث"* "The Emperor's new mind" لروجر بنروز Roger Penrose، إنه عرضٌ لامع للأفكار العلمية الحديثة وفي نفس الوقت رحلة ممتعة ومفصلة. يقترح المؤلف

---

* تم نشر هذا الكتاب تحت عنوان "العقل والحاسوب" ترجمة أ.وائل أتاسي من منشورات دار طلاس، سلسلة الثقافة المميزة. (المترجم)

وجوب تغير قوانين الفيزياء بحيث يمكن أن تأخذ بعين الاعتبار مظاهر الوعي، وقناعتنا المدروسة بأن روحنا لاتعمل كما يعمل الحاسب.من الوضوح أن قوانين الفيزياء يجب تغيرها بحيث تأخذ بالحسبان الجاذبية الكوانتية، لكنني أشك كثيراً أن ذلك يمكن تحقيقه بالتوافق مع أفكار بنروز. وبما أن الأمر يتعلق بالوعي وعدم الشك المتفحص والمتدبر يجب أن نتذكر دوماً أي قوى وأي قدرات يوظفها وعينا ليخطّئ نفسه، وهذا المبدأ من بين تعاليم التحليل النفسي، يستحق أن لا يُستخف به.



ملحق المصطلحات

Affirmation تأكيد ، مقولة
Algorithme خوارزمية
Amplitude سعة
Approximations تقريبات
Assertion قضية
Attracteur جاذب
Attracteurs étranges الجواذب الغريبة
Auto-adjoint متلاصق ذاتياً
Axiom بديهية
Bassin d'attraction أحواض التجاذب
Calculabilité حسوبية
Capacité استطاعة
Changement d'échèlle تغيير المقياس
Changements de phase تغيرات الطور
Chaos شواش
Cohérence اتساق
Compact متراص
Complexité تعقيد
Computation حساب
Configuration تشكيل
Conjecture مقولة
Connaissance معرفة
Constructions تراكيب
Contradiction تناقضْ
Convection الحمل (الجوي)
Corrélation ترابط
Couplage مزاوجة
Croissance نمو، تزايد
Démonstration برهان
Déterminisme الحتمية
Différenciations تخصصات
Dilemme إشكالية
Données معطيات
Elastic مرن
Energie potentiel طاقة كامنة
Ensemble مجموعة
Equilibre توازن
Ẻrgodique إرغودية
Espace فراغ
flot géodésique السريان الجيوديزي
Fluctuation économique تقلبات اقتصادية
Fluctuation du vide تارجحات الخلاء

Fractal كسوري

Frottement احتكاك

Hasard مصادفة

Hypersphère الكرة الفائقة

Géométrisation التمثيل الهندسي

Group زمرة

Group de renormalization زمرة التنظيم

Idéalisation تمثيل

Incertitude ارتياب

Incompatibles غير متوافقين

Incompleteness اللاتمامية

Indépendance استقلالية

Invariance لا تغير

Impreditibilité اللاتنبوية

Imprévisible لا متوقع

Impulsion الاندفاع

Indemontrable دحوض، لا يبرهن

Information معلومة، معلومات

Intéraction تفاعل

Intuition حدس

Irréversibilité اللاعكوسية

Logiciels برمجيات

Manipulations منابلات

Mesure قياس

Modes حالات

Moment angulaire العزم الزاوي

Mutation طفرة

NP Complet تامة غير حدودية

Observable ملحوظة

Opérateur مؤثر

Operationellement عملياتياً

Paradigme أنموذج، إطار مفاهيمي

Paradoxe مفارقة (رياضية)

Particules virtuelles الجسيمات الوهمية

Phase طور

Pérturbation اضطراب، تشويش

Polynomial كثير حدود

Préditibilité تنبوئيّة

Prédestination القضاء والقدر

Probabilités احتمالات

Processus سيرورة

Projection إسقاط

Prolifération تكثيراً

Position موضع

Postulat مسلمة

Recombinasion اقتران

Redondance إسهاب، حشو

Reduction اختزال

Régle قاعدة رياضية

Régles d'inference قواعد الاستدلال

Regularité انتظام

Resonnante طنينية

Séminaire ندوة علمية

Sciences molles العلوم الطرية

Simulation محاكاة

Substantial ملموس

Superposition تراكب

Support حامل

Systéme منظومة

Tourbillons دوارات

Transformation تحويلات

Turbulence الاضطراب

Verre de spin كأس الدوران

Vide الخلاء

Vitesse de libération سرعة الانفلات

الفهرس


Bibliotheca Alexandrina
1099644